Lehrbuch der Physik

zum

Schulgebrauche.

Bearbeitet von

Wilhelm Winter
K. Gymnasialprofessor in Neuburg a. D.

Mit 345 eingedruckten Abbildungen.

Vierte Auflage.

München
Theodor Ackermann
Königlicher Hof-Buchhändler.
1897.

Vorrede.

Die Entwicklung der bayerischen Realschulen, wie sie sich auf der sprachlich-historischen und mathematisch-naturwissenschaftlichen Grundlage vollzogen hat, legte mir den Entschluß nahe, für den Unterricht in der Physik ein Lehrbuch zusammenzustellen, welches gerade für solche realistische Mittelschulen geeignet wäre. Sowohl die Erfolglosigkeit bei der Auswahl eines passenden Buches unter den vorhandenen als auch die Aufforderung befreundeter Fachgenossen veranlaßten mich dann, meine mehrjährigen Erfahrungen im physikalischen Unterrichte zur Herstellung dieses Buches zu benützen, das ich nun der wohlwollenden Beurteilung meiner verehrten Herren Fachgenossen übergebe. Bei Abfassung desselben leitete mich nur der eine Gedanke, all das und nur das aufzunehmen, was in Mittelschulen gelehrt werden kann und entweder zur allgemeinen Bildung notwendig oder zur praktischen Verwertung fähig ist, und die Darstellung stets so zu wählen, wie sie der jeweiligen Fassungskraft der Schüler, sowie insbesondere ihrem Vorrat von mathematischem Wissen entspricht. Man wird deshalb wohl auf der ersten Stufe nur einfache Gedankenfolgen und etwas breite Ausführung, auf der mittleren Stufe ein tieferes Eingehen in die Einzelheiten der Vorgänge und Gesetze, wozu sich ja Elektrizität und Akustik ganz vorzugsweise eignen, und auf der dritten Stufe eine strenge Behandlung der Optik und Mechanik mit ausgiebiger Benützung und Anwendung der mathematischen Kenntnisse finden.

Derselbe Wunsch nach Anpassung des Lehrstoffes an die Fassungskraft der Schüler veranlaßte mich insbesondere, die Mechanik in zwei Teile zu spalten und den einen Teil, soweit er mit Hilfe einfacher Arithmetik behandelt werden kann, gleich auf der ersten Stufe durchzunehmen, da er die Grundlehren über Kraft, Arbeit und einfache Maschinen enthält, ohne welche in die Physik nicht eingedrungen werden kann; der zweite Teil erfährt dann auf der dritten Stufe eine eingehende, mathematische Behandlung.

Der Abschnitt über Akustik dürfte für gewöhnliche Mittelschulen etwas zu reich sein; doch habe ich denselben deshalb so ausführlich behandelt, um das Buch auch für Lehrerbildungsanstalten

passend zu machen, an denen ja die Akustik eine ganz besondere Durchbildung erfahren muß.

Bei der Behandlung des Lehrstoffes dem Umfange nach habe ich innerhalb der Schranken, welche durch die Fassungskraft der Schüler gezogen sind, stets nur dasjenige aufzunehmen mich bemüht, was zum Verständnis der Vorgänge und Gesetze notwendig ist, und dies durch die einfachsten Experimente zu beweisen gesucht; ein Hinausgehen über diesen engsten Rahmen durch Anfügung weiterer Beispiele, Anwendung der erkannten Gesetze auf ähnliche Vorgänge, Erklärung von weiteren Erscheinungen mittels der vorhandenen Kenntnisse ist und bleibt der Thätigkeit des Lehrers im Unterrichte vorbehalten. Doch glaubte ich weder Zeit noch Raum sparen zu sollen, wenn es sich darum handelte, den physikalischen Gesetzen in ihren Anwendungen für praktische Bedürfnisse zu folgen und zu zeigen, wie die einfachen und leichtverständlichen Eigenschaften und Kräfte in der mannigfaltigsten Weise benützt werden für die Zwecke der Technik und Industrie, des Handels und Gewerbes. Denn neben der einen Hauptaufgabe, die Naturgesetze zu erkennen, die Beobachtungsgabe auszubilden, den Verstand an der Erklärung komplizierter Erscheinungen zu schärfen und dadurch eine allgemeine Geistesbildung zu vermitteln, hat der Unterricht in der Physik gerade an den realistischen Mittelschulen noch die besondere Aufgabe, den Schülern ein möglichst klares und umfassendes Verständnis mitzugeben für all die tausendfältigen Vorkommnisse, Erscheinungen und Verwendungen im technischen Leben unserer Zeit, in das sie nach der Schule einzutreten berufen sind.

Möge das Buch angesehen werden als das, was es sein soll, ein Lehrbuch der Physik an realistischen Mittelschulen, und möge es als solches wohlwollende Beurteilung und freundliche Aufnahme finden!

Kaiserslautern, im Mai 1886.

W. Winter,
Kgl. Reallehrer.

Vorrede zur vierten Auflage.

Die fortdauernde Beliebtheit, der sich das Buch von seite der Herren Kollegen erfreut, veranlaßte mich, vorliegender Neuauflage eine besondere Aufmerksamkeit zuzuwenden. Ich war deshalb bestrebt, alle Winke und Andeutungen, welche mir freundlichst gemacht wurden, zu verwerten, und habe demgemäß besonders in Optik, Elektrizität und Mechanik manches anders gestaltet, indem ich einiges einfacher faßte, anderes etwas ausführlicher darstellte. Mehrfachen Wünschen entsprechend habe ich im Anhang eine Sammlung von Aufgaben beigegeben, welche, da sie sich dem Unterrichtsgang anschließen, ohne ausführliche Anleitung den Schülern von Stunde zu Stunde zur Bearbeitung bezeichnet werden können. Außer diesen sind dann noch schwierigere vermischten Inhalts angefügt, welche wohl bei der vorgeschriebenen Wiederholung und Erweiterung im letzten Kurs gute Dienste thun dürften. Die Aufgaben sind teils von den schon erprobten eines meiner anderen Bücher herübergenommen, teils neu für die Zwecke dieses Buches entworfen, und ich war dabei bestrebt, das Schematische und Schablonenhafte zu vermeiden, um bei jeder Aufgabe dem Schüler etwas neues zum Denken aufzugeben. Ferner ist ein alphabetisches Sachregister angefügt, was das Nachschlagen erleichtert.

Auch bei dieser Auflage war ich bemüht, sie so einzurichten, daß neben ihr jede ältere im Unterrichte mitbenützt werden könne, und ich werde auch fernerhin diesem Prinzip treu bleiben.

Schließlich spreche ich denjenigen Herren Kollegen, welche mich auch bei dieser Auflage mit freundlichem Rate unterstützten, neuerdings meinen besten Dank aus, und füge den Wunsch bei, daß das Buch seine alten Freunde behalten, neue gewinnen und stets zum Gedeihen des physikalischen Unterrichtes beitragen möge.

Neuburg a. D., Anfang 1897.

Der Verfasser.

Inhalts-Übersicht.

meter. Gefälle, Leitungswiderstand; Stromstärke; Batterie. Galvanis Grundversuch, Volta's Kontaktelektrizität. Wirkung zweier Stromteile auf einander, Erdstrom, Solonoid, Elektromagnet; elektrische Klingel, Haustelegraph; Telegraph, Morse'scher Schreibtelegraph, Nadel- und Zeigertelegraph, Leitung; elektrische Uhr. Chemische Wirkung des Stromes: Elektrolyse von Wasser und von Salzen; elektrolytisches Gesetz; Polarisation. Galvanoplastik und Galvanostegie.

Achter Abschnitt.

Induktions-Elektrizität.

Fundamental-Versuche und -Gesetze. Induktionsapparate. Induktion auf eigene Leitung. Induktion im magnetischen Feld, magnetelektrischer Induktionsapparat. Dynamomaschine. Gramme'scher Ringinduktor. Wärmewirkung des Stromes, Bogenlicht, Glühlicht; elektrodynamische Maschine, Kraftübertragung. Sekundärelemente, Akkumulatoren. Telephon, Mikrophon; Thermoelektrizität.

Neunter Abschnitt.

Wellenlehre und Akustik.

Entstehung, Form, Bedeutung, Reflexion der Wellen; Entstehung des Schalles, Form der Schallwellen; Geschwindigkeit, Stärke, Reflexion des Schalles. Ton, Schwingungszahl, Schwingungsverhältnisse der Töne. Schwingende Saiten, Obertöne. Schwingende Stäbe und Platten. Gedeckte und offene Pfeifen. Mitschwingen, Resonatoren, Interferenz. Menschliche Sprache; Ohr.

Zehnter Abschnitt.

Optik.

Wesen des Lichtes. Durchsichtigkeit, Schatten. Geschwindigkeit des Lichtes. Photometer. Reflexion. Planspiegel; sphärische Spiegel. Brechung des Lichtes. Atmosphärische Strahlenbrechung. Grenzwinkel, Totale Reflexion. Prisma. Sphärische Linsen. Auge. Lupe. Projektionsapparate. Fernrohr, Operngucker; Mikroskop; Stereoskop. Zerstreuung des Lichtes, Spektrum. Achromatische Linsen; Frauenhofer'sche Linien. Spektralanalyse. Farbenlehre. Phosphorescenz, Fluorescenz. Wärmestrahlen, chemische Strahlen.

Elfter Abschnitt.

Mechanik.

Hebel. Schwerpunkt. Räderwerk, Uhr. Wage. Schiefe Ebene. Keil, Schraube. Fall; Wurf, gleichförmig beschleunigte Bewegung. Zentralbewegung; Pendel; Stoß; lebendige Kraft. Mechanisches Äquivalent der Wärme; elektrische Energie. Allgemeine Lehre von der Energie. Verwandlung, Erhaltung der Energie.

Zwölfter Abschnitt.

Anhang.

Interferenz der Wellen, des Lichtes. Beugung der Wellen, des Lichtes; Polorisation, Doppelbrechung des Lichtes.

Die absoluten Maßeinheiten: die mechanischen, elektrostatischen, elektromagnetischen, praktischen Einheiten.

Aufgaben.

Erster Abschnitt.

Allgemeine Eigenschaften der Körper.
Lehre von den Kräften.

1. Aufgabe der Physik.

Die Physik ist die Lehre von den Naturerscheinungen. Aufgabe der Physik ist es, die Veränderungen, welche wir an den Körpern wahrnehmen, und welche wir Vorgänge oder Erscheinungen nennen, zunächst genau zu beobachten und zu beschreiben, und dann nach den Ursachen zu forschen, welche diese Vorgänge bewirkten. Solche Ursachen, welche Veränderungen im Zustande eines Körpers hervorbringen, nennt man Kräfte, Naturkräfte. Die Physik hat ferner die Aufgabe, zu untersuchen, in welcher Weise zwei oder mehrere Kräfte zusammenwirken, und dann nach Gesetzen zu forschen, nach welchen diese Ursachen eine Wirkung hervorbringen. Schließlich lehrt die Physik auch, wie die Kräfte nutzbar gemacht werden zu den verschiedenen Arbeiten im gewöhnlichen Leben, sowie in Gewerbe und Industrie.

Allgemeine Eigenschaften der Körper.

Allgemeine Eigenschaften sind solche, welche allen Körpern zukommen. Manche dieser Eigenschaften sind von solcher Wichtigkeit, daß ohne sie ein Körper nicht einmal gedacht werden kann, daß sie also zum Begriffe dessen, was wir Körper, Stoff oder Materie nennen, unumgänglich notwendig sind.

2. Undurchdringlichkeit oder Raumerfüllung.

Jeder Körper nimmt einen Raum ein und erfüllt ihn; dort, wo ein Körper ist, kann nicht zugleich ein anderer sein.

Beispiele: Der Nagel, der ins Holz geschlagen wird, verdrängt die Holzmasse; dort wo die Masse des Nagels ist, kann nicht zugleich die Holzmasse sein. Wenn man zwei pulverförmige Körper vermischt, so nimmt doch noch jeder seinen Raum ein; dort wo ein

Teilchen des einen Körpers ist, befindet sich nicht zugleich ein Teilchen des anderen Körpers, sondern dieses sitzt daneben. Sogar bei sehr inniger Mischung, wie etwa bei Auflösung von Zucker in Wasser, hört die Masse des Zuckers nicht auf, den Raum zu erfüllen, sondern die Teilchen des Zuckers dringen zwischen die Teilchen des Wassers, drängen sie beiseite und erfüllen also auch noch einen Raum. Doch tritt bei Auflösung eines festen Körpers in einem flüssigen, oder bei Mischung zweier flüssigen Körper meist eine Volumänderung (=Verminderung) ein.

Auch die Luft ist raumerfüllend und schon deshalb als Körper anzusehen. Wenn man ein Becherglas mit der Öffnung nach abwärts ins Wasser taucht, so dringt das Wasser wohl etwas, aber keineswegs ganz in die Höhlung des Glases ein; daran erkennen wir, daß dort etwas ist, was den Raum erfüllt und dem Eindringen des Wassers einen Widerstand entgegenstellt; deshalb müssen wir die Luft auch unter die Körper rechnen.

3. Zusammendrückbarkeit und Ausdehnbarkeit.

Jeder Körper läßt sich durch Druck auf einen kleineren Raum zusammenpressen und durch Zug auf einen größeren Raum ausdehnen.

So nimmt eine Silberplatte einen kleineren Raum ein, wenn sie durch sehr großen Druck zur Münze geprägt wird. Gewalztes und zu Draht gezogenes Eisen nimmt einen kleineren Raum ein als ausgeglühtes, weil es beim Walzen und Drahtziehen sehr stark gedrückt wird. Selbst die härtesten und festesten Körper können zusammengedrückt werden; doch beträgt diese Verkleinerung bei allen festen Körpern nur sehr wenig. Ein stabförmiger Körper wird durch Zug länger und auch sein Volumen wird dabei größer.

Wasser wird durch gewöhnlichen Druck nur unmerklich kleiner, so daß man lange glaubte, es ließe sich gar nicht zusammendrücken. Auch durch den stärksten Druck kann man kaum mehr als 50 *ccm* in ein schon mit Wasser gefülltes *cdm* hineinbringen. Das Wasser an der tiefsten Stelle des Meeres wird zusammengepreßt durch das ganze Gewicht der über ihm liegenden Wassersäule von 8000 *m* Höhe, und doch enthält ein *cdm* in dieser Tiefe höchstens um 35 *ccm* mehr Wasser als an der Oberfläche. Luft und luftförmige Körper lassen sich schon durch verhältnismäßig kleine Kräfte auf bedeutend kleinere Räume beschränken. Man kann nämlich Luft leicht auf einen 2 mal kleineren Raum zusammendrücken; durch Anwendung von immer größeren Kräften läßt sie sich immer mehr zusammendrücken, so daß ihr Raum 100 mal ja sogar 500 mal kleiner wird. Aber das Gesetz der Raumerfüllung bleibt bestehen,

und man ist deshalb nicht imstande, die Luft so sehr zusammenzupressen, daß sie gar keinen Raum mehr einnehmen würde.

4. Die Porosität.

Kein Körper nimmt den Raum, den er einzunehmen scheint, vollständig ein, sondern jeder hat in seinem Innern kleine Löcher, Gänge und Höhlungen, die nicht mit der Masse des Körpers, sondern mit einem anderen Stoffe ausgefüllt sind, meist mit Luft oder Wasser. Diese Löcher und Gänge nennt man Poren, und die Eigenschaft heißt Porosität. Sehr stark porös ist z. B. ein Schwamm, Brot, Bimsstein, das Mark von Binsen; bei ihnen sind die Poren so groß, daß man sie sieht (großporig).

Sehr porös sind ferner Kreide, Gyps, Mörtel, Thon, Ziegelsteine, Sandsteine, manche Kalksteine, Holz, Zucker u. s. w. Die Poren dieser Körper sind sehr zahlreich, aber doch so fein, daß man sie mit freiem Auge nicht oder nur kaum sehen kann (kleinporig). Taucht man einen solchen Körper ins Wasser, so dringt es in die Poren des Körpers ein; zerbricht man ihn dann, so zeigt er sich auch im Innern feucht. Die meisten dieser Körper sind dadurch porös geworden, daß bei ihrer Bildung oder zu ihrer Herstellung Wasser verwendet wurde, wie bei den Ziegelsteinen, und daß dann beim Austrocknen an Stelle des Wassers Luft in die entstandenen Poren eintrat.

Thönerne Gefäße würden die Flüssigkeit auch in ihr Inneres eindringen und durchsickern lassen; um das zu verhindern, glasiert man sie innen, meist auch außen, d. h. man überzieht sie mit einer Glasschichte, welche die Poren verstopft. Ähnlichen Zweck hat das Auspichen der Fässer, das Versiegeln der Weinflaschen, Zementieren der Ställe, Wasserbehälter und Abtrittgruben, das Ölen und Firnissen hölzerner Gegenstände u. s. w.

Weil der Mörtel und die meisten Bausteine sehr porös sind, so würde das Wasser des Erdbodens in den porösen Wänden des Hauses emporsteigen und das Haus feucht halten. Dagegen schützt man sich durch Anbringen einer nicht porösen Zwischenlage aus Asphalt (Erdpech) oder Bleiplatten.

Sehr stark poröse trockene Körper, wie Gyps, unglasierter Thon, unächtes Porzellan (Fayence) an der Bruchfläche und ähnliche kleben an der Zunge, weil sie die an der Zunge befindliche Feuchtigkeit sehr stark aufsaugen.

Holz, obwohl sehr porös, läßt das Wasser doch nur langsam eindringen, so daß ein Stück Holz mehrere Wochen, ja Monate im Wasser liegen muß, bis es ganz von Wasser durchdrungen ist; denn die meisten Poren des Holzes bestehen nicht aus Gängen, die das Holz durchsetzen, sondern aus abgeschlossenen Hohlräumen (Zellen).

Der sehr poröse Kork besteht nur aus abgeschlossenen Zellen und gibt, wenn er unbeschädigt ist, einen luft- und wasserdichten Verschluß.

Poröse Gesteine, die der freien Luft ausgesetzt sind, verwittern sehr leicht; denn durch den wechselnden Einfluß von Regen, Luft, Hitze und Kälte werden sie locker, mürbe, zerbrechlich und zerreiblich. Sie sind deshalb als Pflaster und Dachziegel nur wenig dauerhaft.

Manche Stoffe zeigen sich unporös; man nennt sie dicht oder kompakt. Solche sind Marmor, Basalt, Elfenbein, dann die Krystalle und solche Körper, welche aus einem dichten Gefüge vieler kleinen Krystalle bestehen (krystallinische Gesteine), dann solche, welche aus ruhigem Schmelzfluß in den festen Zustand übergegangen sind, wie die Metalle, Glas, Pech, Schwefel, Kautschuk, Porzellan, Klinkersteine u. s. w. Glas hat sich selbst bei hohem Drucke als undurchlässig für Wasser und Luft erwiesen. Doch lassen manche dieser Stoffe bei hohem Drucke Luft und Wasser durch.

Wasser, jede Flüssigkeit und jede Luftart sind nicht porös in dem Sinne wie die festen Körper. Wohl kann leicht ein flüssiger Körper sich mit einem anderen flüssigen Körper vermischen, indem seine Teilchen die des anderen beiseite schieben und sich zwischen dieselben lagern; das Mischen geschieht aber nicht dadurch, daß in einer Flüssigkeit Hohlräume schon zuerst vorhanden sind, und in diese die andere Flüssigkeit eindringt.

5. Teilbarkeit.

Jeder Körper ist teilbar, d. h. er läßt sich durch Anwendung einer Kraft in kleinere Stücke zerteilen, z. B. zerbrechen, zerstoßen, zerreiben u. s. w., oder es lassen sich Teilchen von ihm wegreißen durch Kratzen, Reiben, Schleifen und Feilen. Bedarf es hiezu nur geringer Kraft, so nennt man den Körper weich, bedarf es großer Kraft, so heißt der Körper hart; auch der härteste Körper, der Diamant, ist teilbar, nach gewissen Richtungen spaltbar, und läßt sich mittels seines eigenen Pulvers schleifen. Man sagt, ein Körper ist härter als ein zweiter, wenn man mit dem ersten Körper den zweiten ritzen kann, so ist Diamant härter als Rubin, dann folgen der Härte nach Stahl, Glas, Eisen, Kupfer u. s. w. Um harte Körper zu schleifen, benützt man Pulver von noch härteren Körpern, z. B. Schmirgel, Wiener Kalk, Pariser Rot.

Manche Körper lassen sich ungemein fein zerteilen, z. B. die Farbstoffe; so ist die geringe Menge Farbstoff, die in einer Cochenillelaus enthalten ist, hinreichend, um ein ganzes Glas Wasser rot zu färben, was nur dadurch möglich ist, daß der Farbstoff sich in sehr viele, also auch sehr kleine Teilchen zerlegt hat, so daß in jedem Wassertropfen noch sehr viele solche Teilchen sind. Je feiner sich ein Farbstoff zerreiben läßt und je feiner man ihn zerreibt,

desto besser deckt er, d. h. um so weniger Farbstoff braucht man, um einen Gegenstand so damit zu bestreichen, daß man seinen Stoff nicht mehr sieht. Gut deckende Farben sind etwa Tusch, Berliner Blau, Zinnober, Schweinfurter Grün; schlecht deckt Bleiweiß (Kremser weiß), Ocker und Veroneser Grün. Mehl, hiemit verglichen, ist nicht besonders fein zerteilt, es deckt deshalb auch sehr schlecht.

Riechstoffe müssen sich wohl in ungemein kleine Teile zerlegen; denn da ein erbsengroßes Stück Moschus imstande ist, ein ganzes Jahr hindurch die oft wechselnde Luft eines Zimmers mit seinem Geruche zu erfüllen, ohne daß die Größe des Moschuskügelchens merklich abnimmt, so muß doch das wenige, was sich vom Moschus ablöst, sich in ungemein kleine Teilchen zerlegen, damit jeder Raum im Zimmer solche Teilchen noch enthalte. Der Kieselguhr ist eine Art sehr feinen Sandes, der stellenweise auf der Lüneburger Heide gegraben wird und sich wie Mehl anfühlt. Jedes Körnchen desselben ist aber der Kieselpanzer eines sehr kleinen Tierchens, vergleichbar der Schale einer Muschel. Das sieht man, wenn man den Kieselguhr durch sehr starke Vergrößerungsgläser (Mikroskop) betrachtet.

6. Zusammensetzung der Körper aus Molekülen.

Wenn man sieht, daß man die Körper in sehr kleine Teilchen zerlegen kann, so muß man sich wohl fragen, ob man durch fortgesetztes Teilen, etwa durch Zerreiben, die Teilchen immer kleiner machen könnte, oder ob man annehmen soll, daß die Stoffe aus sehr kleinen Teilchen zusammengesetzt sind, die an sich unteilbar sind. Man nimmt nun wirklich das letztere an, hat sich also zu denken, daß jeder Körper aus ungemein vielen, ungemein kleinen Teilchen besteht, die durch kein Mittel, durch keine Kraft in noch kleinere Teile zerlegt werden können; man nennt ein solches Teilchen Molekül (kleine Masse, kleinstes Massenteilchen). Man muß sich die Moleküle recht klein denken, so daß es gewiß unmöglich ist, ein einzelnes Molekül auch bei der stärksten Vergrößerung zu sehen. Wir sind wohl nicht imstande, einen festen Körper durch Zerreiben oder ein ähnliches mechanisches Mittel in seine Moleküle zu zerlegen. Auch das kleinste Stäubchen, das in der Luft schwebt, das kleinste Tierchen, daß nur bei stärkster Vergrößerung eben noch wahrgenommen wird, die kleinste Zelle, die sich an einer Pflanze befindet, besteht doch noch aus einer ungemein großen Anzahl von Molekülen. Man hat ja berechnen können, daß in der Luft ca. eine Million Moleküle neben einander auf der Länge eines Millimeters liegen, daß also ca. 1 Trillion in einem cmm enthalten sind. Die Chemie lehrt, daß jedes Molekül aus mehreren gleichartigen oder verschiedenen Stoffteilchen besteht, daß es in dieselben zerlegt

und in vielen Fällen aus ihnen wieder zusammengesetzt werden kann, daß diese Stoffteilchen sich aber (bis jetzt) nicht weiter zerlegen lassen. Die Stoffteilchen nennt man Atome (Atom = das Unteilbare).

Man nimmt ferner an, daß auch bei festen und flüssigen Körpern die Moleküle sich nicht berühren, sondern in Abständen neben einander liegen, welche ca. 10mal größer sind als ihre Durchmesser. Die Entfernung zwischen den Mittelpunkten benachbarter Moleküle beträgt bei gewöhnlichen festen oder flüssigen Körpern nicht mehr als ein Zehnmilliontel und nicht weniger als zwei Hundertmilliontel eines Millimeters, so daß ein Kubikmillimeter wenigstens 1000 Trillionen und höchstens 125 000 Trillionen Moleküle enthält. „Dehnt sich eine erbsengroße Glaskugel oder ein Wassertropfen bis zur Größe der Erdkugel aus, so ist jedes Molekül größer als ein Schrotkorn und kleiner als ein Kroquetball" (Thomson). Von den kleinsten bekannten Lebewesen (Mikroben), den Spaltpilzen, gehen ca. 3000 Millionen auf 1 Kubikmillimeter, so daß jedes aus vielen Hunderttausend Millionen Molekülen bestehen kann; deshalb können auch sehr kleine Lebewesen noch einen komplizierten Bau haben.

7. Schwere oder Gravitation.

Unter Schwere versteht man die Eigenschaft jedes Körpers, daß er von der Erde angezogen wird. Infolge dieser Anziehung übt er einen Druck auf seine Unterlage oder einen Zug an seinem Aufhängepunkte aus; ist er durch nichts aufgehalten, so folgt er dem Zug der Schwere und fällt zur Erde.

Unter Schwere versteht man auch eben diese Kraft selbst, mit welcher der Körper von der Erde angezogen wird, und nennt sie auch Schwerkraft. Die Richtung der Schwere geht auf den Mittelpunkt der Erde zu. Man findet diese Richtung leicht, wenn man an einem Faden einen schweren Körper aufhängt und zur Ruhe kommen läßt; die Richtung des Fadens ist dann die Richtung der Schwere (Senkel, Senkblei, Bleilot). Die Richtung der Schwere nennt man lotrecht, scheitelrecht oder vertikal, wohl auch senkrecht. Jede zur vertikalen Richtung senkrechte Richtung heißt horizontal.

Je größer die Masse eines Körpers ist, um so mehr wird er von der Erde angezogen, um so größer ist seine Schwere oder sein Gewicht. Man vergleicht die Massen zweier Körper, indem man ihre Gewichte vergleicht. Das geschieht mit der Wage, denn sie steht dann im Gleichgewicht, wenn die Gewichte auf beiden Wagschalen einander gleich sind, und man schließt dann, daß auch die Massen einander gleich sind.

Als Einheit der Masse hat man die Masse von 1 *ccm* destilliertem, d. h. ganz reinem Wasser angenommen und nennt diese Masse 1 Gramm. Die Schwere dient uns also, um die Masse der Körper zu bestimmen, die Massen mit einander zu vergleichen durch ihr Gewicht, d. h. die Körper zu wägen.

Eine solche Anziehung besteht aber nicht bloß zwischen der Erde und einem in ihrer Nähe befindlichen Körper, sondern die Eigenschaft der Anziehung ist eine ganz allgemeine Eigenschaft aller

Körper. Die Erde zieht auch den Mond an, der Mond zieht aber auch die Erde an, so daß man sagen muß, Erde und Mond ziehen sich gegenseitig an; die Sonne zieht jeden Planeten an; jeder Himmelskörper übt auf jeden anderen eine solche Anziehung aus. Diese allgemeine gegenseitige Anziehung zweier Körper nennt man die allgemeine Gravitation, die Universalgravitation; die Erdschwere eines Körpers, d. h. die Anziehung eines Körpers von seite der Erde ist nur ein besonderer Fall dieser ganz allgemeinen Eigenschaft.

8. Trägheit oder Beharrungsvermögen.

Unter Trägheit oder Beharrungsvermögen versteht man das Bestreben jedes Körpers, den Zustand der Bewegung oder Ruhe, in dem er sich eben befindet, unverändert beizubehalten.

Man beobachtet stets, daß ein Körper, wenn er in Ruhe ist, irgendwo liegt oder hängt, auch in Ruhe bleibt, und nicht von selbst oder aus eigenem innerem Antrieb eine Bewegung anfängt; es muß vielmehr von außen eine Ursache auf ihn wirken, damit er anfängt, sich zu bewegen.

Aber auch, wenn ein Körper in Bewegung ist, findet man, daß er das Bestreben hat, die Bewegung unverändert beizubehalten. Dies scheint jedoch auf den ersten Blick nicht so zu sein; denn man bemerkt, daß jeder in Bewegung befindliche Körper nach und nach an Bewegung verliert; z. B. eine auf einer Eisfläche fortgerollte Kugel läuft immer langsamer und bleibt schließlich liegen, ein in rasche Umdrehung versetztes Rad (Schwungrad) geht langsamer, wenn keine Kraft mehr auf dasselbe wirkt und bleibt schließlich stehen, eine an einem Faden aufgehängte und in Schwingung versetzte Kugel schwingt immer langsamer und kommt zur Ruhe, u. s. w. Man möchte demnach schließen, daß, wenn die Kraft, die dem Körper seine Bewegung gegeben hat, aufhört zu wirken, und keine andere Kraft an ihre Stelle tritt, der Körper wohl noch eine Zeit lang seine Bewegung beibehält, sie aber doch nach und nach aufgibt und wieder in die Ruhe zurückkehrt.

Dies ist jedoch nicht richtig, wie man aus folgendem ersehen kann. Werfe ich eine Kugel auf der Straße weiter, so rollt sie eine gewisse Strecke weit; werfe ich sie auf eine glatte Holzbahn, etwa eine recht lange Kegelbahn, so rollt sie weiter; werfe ich sie auf die spiegelglatte Eisfläche eines Sees, so läuft sie noch viel weiter; und würde ich eine sehr glatte Stahlkugel auf einer Glasfläche weiterrollen können, die so groß wäre wie ein See, so würde die Kugel gewiß noch viel weiter laufen. Man sieht daraus, daß die Kugel nicht etwa das Bestreben hat, immer langsamer zu gehen,

denn sonst müßte sie dieses Bestreben auf allen Bahnen in gleicher Weise und in gleichem Maße äußern, also auf allen Bahnen gleich weit laufen; man schließt vielmehr, daß die Kugel das Bestreben hat, ihre Geschwindigkeit unverändert beizubehalten. Nur die Hindernisse, welche die Rauheiten und Unebenheiten der Bahn ihr bereiten, nehmen ihr die Bewegung derart, daß die Kugel immer einen Teil ihrer Bewegung hergeben und aufwenden muß, um diese Hindernisse zu überwinden; je glatter dagegen die Bahn ist, je geringer also diese Hindernisse sind, um so weniger gibt die Kugel von ihrer Geschwindigkeit her, und um so weiter läuft sie. Deshalb schließt man, wenn gar keine Hindernisse vorhanden wären, so würde der Körper gar nichts von seiner Geschwindigkeit hergeben, also seine Bewegung ganz unverändert fortsetzen.

Ähnliche Beispiele sind: Ein Rad läuft um so länger, je glatter die Zapfen sind, auf denen es ruht, und je besser diese geschmiert sind. Eine sehr schwere Bleikugel, die an einem möglichst dünnen und langen Stahldrahte aufgehängt ist, schwingt mehrere Tage lang fort, denn sie hat nur einen sehr geringen Luftwiderstand zu überwinden. Ein weiteres Beispiel ist ein Kreisel.

Wir können leider bei keinem in Bewegung gesetzten Körper sämtliche Hindernisse wegschaffen und so zeigen, daß der bewegte Körper seine Bewegung wirklich unverändert beibehält; wir müssen aber aus den oben angeführten und ähnlichen Betrachtungen schließen, daß ein in Bewegung befindlicher Körper das Bestreben hat, diese Bewegung unverändert beizubehalten, oder: Ein in Bewegung befindlicher Körper kann nicht von selbst oder aus eigenem Antriebe seine Bewegung verändern, er kann nicht die Geschwindigkeit größer oder kleiner machen, er kann auch nicht die Richtung der Bewegung verändern. **Jeder Körper beharrt in dem Bewegungszustande, in dem er sich eben befindet.** (Galilei.)

Das beste Beispiel, das auch den sichersten Beweis für die Richtigkeit dieses Gesetzes der Trägheit liefert, ist unsere Erde. Sie ist eine große Kugel, schwebt vollkommen frei im leeren Himmelsraume, dreht sich wie ein Kreisel um ihre Achse, braucht zu dieser Drehung einen Tag, und behält seit Menschengedenken diese Bewegung unverändert bei. Da man nachweisen kann, daß seit 2000 Jahren die Zeit dieser Umdrehung, also die Länge eines Tages, sich noch nicht um $^1/_{20}$ Sekunde verändert hat, so sieht man, daß die Erde bei ihrer Umdrehung keine wesentlichen Hindernisse findet, und die Geschwindigkeit, welche sie einmal bekommen hat, unverändert beibehält. Ebenso findet die Erde bei ihrem jährlichen Laufe um die Sonne keine Hindernisse und setzt deshalb auch diese Bewegung unverändert fort.

Lehre von den Kräften.

9. Erklärung der Kraft.

Nach dem Trägheitsgesetze ändert ein Körper nicht von selbst seinen Bewegungszustand. Soll ein Körper irgend eine Veränderung seines Bewegungszustandes erleiden, so ist dazu eine äußere Ursache notwendig. Jede solche Ursache nennen wir Kraft. **Kraft ist die Ursache einer Veränderung des Bewegungszustandes.** Beispiel. Wenn wir einen Stein fallen lassen, so sehen wir, daß er anfangs in Ruhe war, daß er dann eine Bewegung bekommt, und daß diese sogar immer rascher wird, je länger er fällt; wir schließen, daß auf ihn eine Kraft von außen wirkt, die ihm eine Bewegung gibt, und da diese Bewegung sogar immer schneller wird, so schließen wir, daß die Kraft beständig und fortwährend auf den Körper wirkt; denn die Kraft gibt dem Körper zu seiner erlangten Geschwindigkeit, die er vermöge des Trägheitsgesetzes beibehält, immer noch mehr Geschwindigkeit dazu. Die hier wirkende Kraft ist die Anziehungskraft oder Schwerkraft der Erde.

Wenn wir einen Stein in die Höhe werfen, so sehen wir, daß er immer höher, aber auch immer langsamer fliegt, bald ganz stehen bleibt, und dann anfängt herunterzufallen. Wir schließen, daß auf den aufwärts fliegenden Stein eine Kraft nach abwärts wirkt, die ihm von seiner Geschwindigkeit, die er nach dem Trägheitsgesetze beibehalten will, immerfort etwas hinwegnimmt, bis er keine Geschwindigkeit mehr hat. Auch diese Kraft ist die Schwerkraft. Hat der Stein den höchsten Punkt erreicht, so bekommt er durch Einwirkung der Schwerkraft wieder eine nach abwärts gerichtete Geschwindigkeit wie im vorigen Beispiel.

Betrachten wir, wie die Lokomotive den Eisenbahnzug in Bewegung setzt, so sehen wir, daß der Zug zuerst in Ruhe ist, dann eine Bewegung erhält und daß diese Bewegung immer rascher wird. Wir schließen, daß in der Lokomotive eine Kraft vorhanden ist, welche dem Eisenbahnzuge eine Bewegung erteilt, und ihm zu der Bewegung, die er schon erhalten hat und die er infolge der Trägheit beibehält, immer noch etwas Geschwindigkeit dazu gibt. Es ist die Dampfkraft, die in der Lokomotive thätig ist und diese Bewegungsänderung hervorbringt.

Ist der Zug einmal im Laufen, so behält er durch sein Beharrungsvermögen die erhaltene Geschwindigkeit unverändert bei. Wenn also keine äußeren Hindernisse da wären, so würde er mit unveränderter Geschwindigkeit auf ebener Strecke von selbst immer weiter rollen, sogar wenn man den Dampf der Lokomotive absperrt.

Da aber die Räder in den Achsen und auf den Schienen Reibung haben, und auch die Luft einen großen Widerstand hervorbringt, so muß man in der Lokomotive den Dampf weiter wirken lassen, um die Hindernisse zu überwinden; geschieht dies, so hat der Eisenbahnzug keine weiteren Hindernisse und behält seine Bewegung unverändert bei. Reibung und Luftwiderstand sind demnach auch Kräfte, da sie den Bewegungszustand eines Körpers verändern. Soll der Zug halten, so sperrt man den Dampf ab; der Zug sucht nun seine Geschwindigkeit nach dem Trägheitsgesetze beizubehalten, aber die Reibung und der Luftwiderstand machen nun seine Bewegung langsamer; man vergrößert sogar die Kraft der Reibung durch Bremsen und bewirkt so, daß die Bewegung rasch abnimmt und der Zug bald zum Stehen kommt.

Außer den schon angeführten Kräften, der Schwerkraft, der Dampfkraft und der Reibung, gibt es noch mehrere Arten von Kräften, nämlich: die Kraft des fließenden Wassers und des Windes, sowie überhaupt jeder bewegten Masse, die Kraft des Magnetes und der Elektrizität, die elastische Kraft, die Kraft der Wärme im allgemeinen und die Kraft von Menschen und Tieren, u. a. m.

Wenn wir aber auch die Wirkungen der Kräfte in diesen einfachen Fällen und später in viel komplizierteren beobachten, untersuchen und verstehen können, so ist uns das Wesen der Kraft doch ein unerforschtes Rätsel. Wir kennen nicht den Grund der Kraft, wissen also nicht, warum die Erde den Stein anzieht, und haben ebenso wenig Einblick in den Grund der anderen Kräfte. Wir wissen nicht, wie es zugeht, daß Erde und Sonne, oder sonst zwei weit entfernte Himmelskörper sich auf große Entfernungen hin und trotz der großen Entfernungen anziehen; ebenso wenig wissen wir, worin der Grund liegt, oder wie es zugeht, daß ein Magnetpol ein Stück Eisen anzieht. Wir beobachten das Vorhandensein der Kräfte an ihren Wirkungen, die Kraft selbst und die Art ihrer Wirkung entzieht sich unserer Wahrnehmung. Wenn also im Folgenden von Kräften die Rede ist, so betrachten wir und können nur betrachten die Wirkung dieser Kräfte, den Zug und Druck, oder die Bewegung, welche sie hervorbringen.

10. Maß der Kräfte.

Um die verschiedenen Kräfte mit einander vergleichen und messen zu können, muß man sie alle mit einer Kraft vergleichen, und als solche empfiehlt sich die Schwerkraft der Erde, teils weil sie uns am bekanntesten ist, teils weil sie in ihrer Wirkung einfach, gleichmäßig und unveränderlich ist.

Als Einheit der Kraft nimmt man den Zug an, mit dem die Erde 1 *ccm* Wasser, also die Masseneinheit, anzieht, und nennt

diese Kraft auch 1 Gramm. Unter 1 *g* Kraft ist also nicht die Masse von 1 *g* zu verstehen, sondern die Kraft, mit welcher die Erde 1 *ccm* Wasser anzieht, oder eine gleich große Kraft. Vielfach nimmt man auch die tausendmal größere Kraft, das Kilogramm, als Krafteinheit an.

Will man an einem Punkte eine Kraft wirken lassen, so kann man das am einfachsten dadurch machen, daß man an den Punkt einen schweren Körper hängt; die Erde zieht dann an dem schweren Körper und dadurch an dem Punkte.

Will man etwa wissen, welche Kraft, welcher Zug erforderlich ist, um eine Schnur oder einen Draht zu zerreißen, so hängt man ihn an einem Ende auf und hängt an das andere Ende nach und nach so viele *kg*, bis der Draht zerreißt; geschieht dies bei 142 *kg*, so sagt man, zum Zerreißen dieses Drahtes ist eine Kraft von 142 *kg* erforderlich.

Will man etwa die Zugkraft eines Pferdes prüfen, so spannt man es an ein Seil, läßt dieses über eine Rolle laufen und etwa in einen Brunnenschacht hinunterhängen, und hängt an dieses Ende nach und nach so viele Gewichte, als das Pferd eben noch gut ziehen kann. Sind dies 43 *kg*, so beträgt die Zugkraft des Pferdes 43 *kg*.

Ähnlich kann man die Zugkraft einer Lokomotive, die Kraft, die man braucht, um eine Maschine zu drehen, die Tragkraft eines Magnetes, die Kraft der Reibung ꝛc. bestimmen.

Alle Kräfte vergleicht und mißt man also mit der Schwerkraft, also mit dem *g*, *kg* ꝛc.

11. Zusammensetzung der Kräfte.

Wirken auf einen Körper mehrere Kräfte, so bleibt er entweder in Ruhe (in dem Bewegungszustand, in welchem er sich eben befindet), oder er kommt in Bewegung (ändert seinen Bewegungszustand). Unter Statik versteht man die Lehre von den Bedingungen, unter welchen zwei oder mehrere Kräfte auf einen Körper so wirken, daß er in Ruhe bleibt; Dynamik ist die Lehre von der Bewegung, welche ein Körper unter der Wirkung einer oder mehrerer Kräfte macht.

Wirken zwei Kräfte auf einen Punkt, so sollte er zwei Bewegungen zugleich machen, was nicht möglich ist; er macht deshalb nur eine einzige Bewegung; er bewegt sich also ebenso, wie wenn auf ihn nur eine Kraft wirken würde; man kann deshalb die zwei Kräfte durch eine einzige ersetzen; ebenso ist es, wenn auf den Körper mehrere Kräfte zugleich wirken. **Mehrere auf einen Punkt wirkende Kräfte können stets durch eine einzige Kraft ersetzt werden.** Die Kräfte, welche auf den Körper wirken, nennt man Seitenkräfte oder Komponenten; die eine Kraft, die

imstande ist, dasselbe zu leisten wie die Seitenkräfte zusammen, heißt die Resultierende, Resultante oder Mittelkraft. Die Größe und Richtung dieser Mittelkraft findet man nach folgenden Gesetzen:

1) Wenn die Kräfte in derselben Richtung wirken, so ist die Resultierende gleich der Summe der Kräfte und wirkt auch in derselben Richtung. Z. B. ziehen 5 Arbeiter an einem Wagen, so ist ihre Kraft gleich der eines Pferdes. Wird ein Schiff durch Dampf und Wind getrieben, so ist seine Bewegung so groß, wie wenn es von einer Kraft getrieben würde, die gleich der des Dampfes und Windes zusammengenommen ist. Die Balken einer Brücke müssen so stark gemacht werden, daß sie nicht bloß ihr eigenes Gewicht und die auf ihnen liegenden Querbalken, sondern auch noch die schwersten Lastwagen gut tragen können.

2) Wirken zwei Kräfte in entgegengesetzter Richtung und sind sie gleich groß, so heben sie sich auf, ihre Resultierende ist = 0; sind sie nicht gleich, so ist ihre Resultierende gleich der Differenz der beiden Kräfte und wirkt in der Richtung der größeren Kraft. Z. B. fährt ein Dampfschiff stromaufwärts, und ist die Kraft des Dampfes größer als der Druck des fließenden Wassers, so kommt das Schiff wirklich vorwärts, aber nur langsam, wie wenn es in einem See wäre und nur eine schwache Dampfmaschine hätte. Läßt die Kraft des Dampfes nach, so daß sie nur gleich dem Drucke des Wassers ist, so bleibt das Schiff stehen, wie wenn es ohne Dampfkraft in einem See wäre; wird die Kraft des Dampfes kleiner als die des Wassers, so geht es zurück, wie wenn es ohne Dampfkraft in einem langsam fließenden Flusse wäre. Ist, bei einem Eisenbahnzuge die Kraft des Dampfes ebensogroß als die Reibung und der Luftwiderstand, so heben sich beide Kräfte auf; es ist geradeso, als wenn keine Kraft auf den Zug wirken würde; er folgt demnach dem Trägheitsgesetze und setzt seinen Weg mit unveränderter Geschwindigkeit fort.

3) Wirken zwei Kräfte unter einem Winkel auf einen Punkt, so findet man die Resultierende, wenn man die zwei Kräfte P_1 und P_2 der Größe und Richtung nach durch Linien darstellt, zu diesen zwei Strecken ein Parallelogramm vervollständigt, und in diesem die vom Angriffspunkte der Kräfte ausgehende Diagonale R zieht. **Die Diagonale des Kräfteparallelogramms gibt die Größe und Richtung der Resultierenden an.** Zum Beweise dieses Satzes dient folgender Versuch: Man läßt eine Schnur über zwei Rollen gehen, hängt an die Enden zwei Gewichte und zwischen die Rollen noch ein Gewicht,

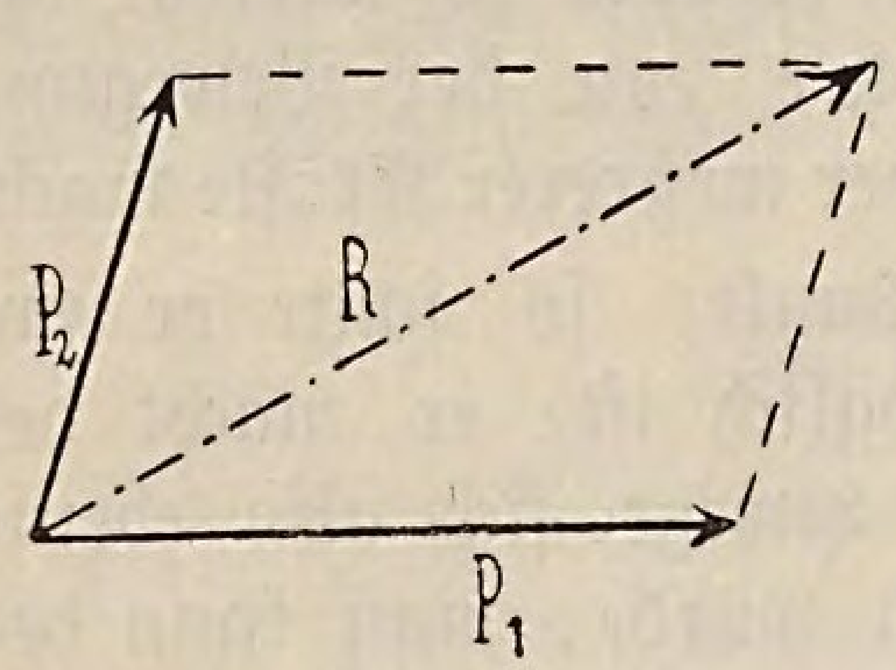


Fig. 1.

welches die Schnur etwas herunterzieht, so daß die zwei seitlichen Gewichte unter einem Winkel auf den mittleren Punkt wirken.

Da die Wirkung der zwei Seitenkräfte aufgehoben wird durch die 3. mittlere Kraft, so wirken die zwei Seitenkräfte ebensoviel, oder haben eine Resultierende, wie eine der 3. gleiche, aber entgegengesetzt, d. h. nach aufwärts gerichtete Kraft. Sucht man die Resultierende durch Zeichnung des Kräfteparallelogramms, so findet man, daß sie wirklich diese Größe hat. Nimmt man immer andere Gewichte zu diesem Versuche, so findet man, daß das Gesetz allgemein gilt und schließt also, daß man die Resultierende zweier solchen Kräfte stets durch Zeichnung des Kräfteparallelogramms finden kann.

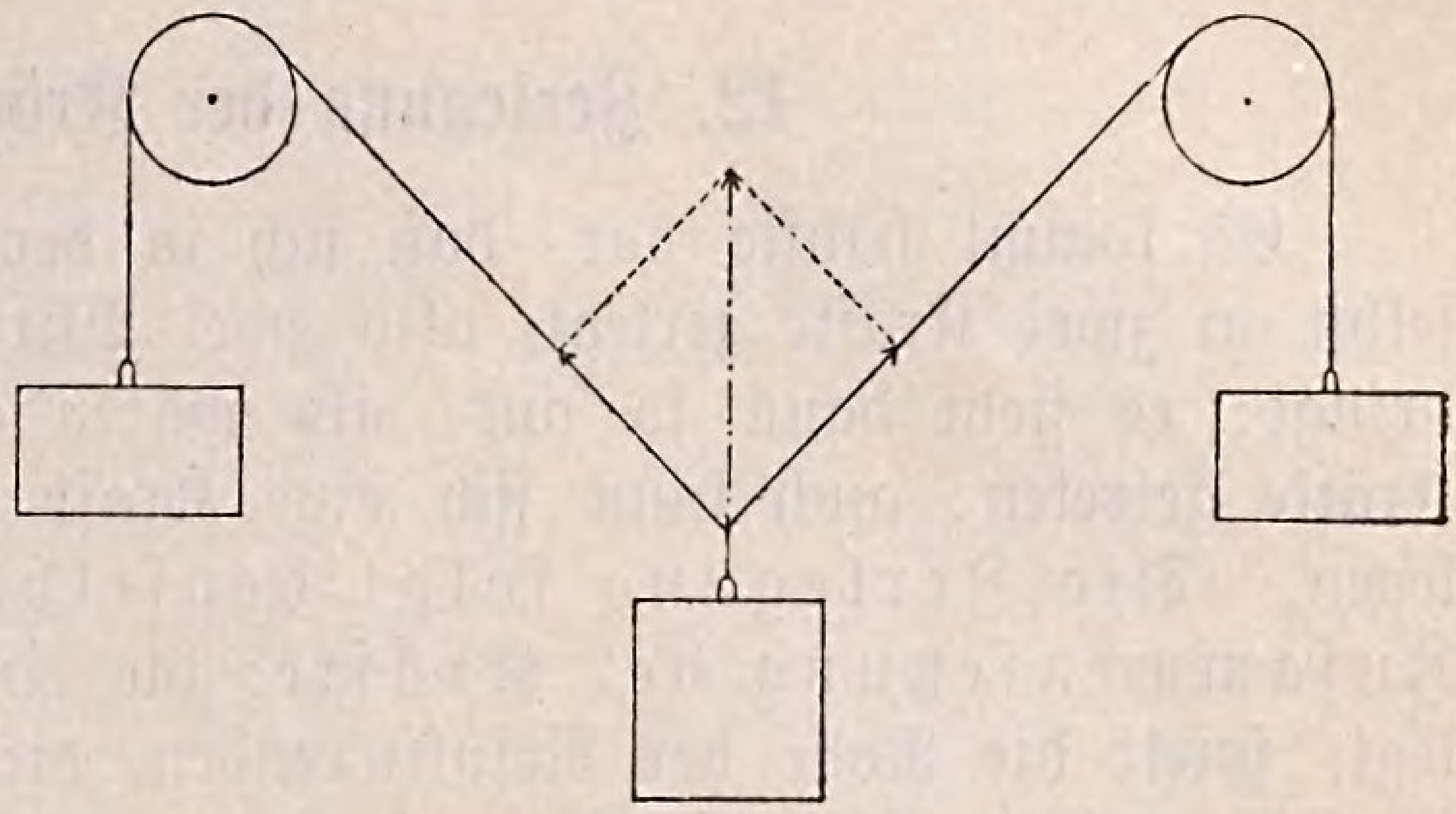


Fig. 2.

Beispiele: Wenn man mit einem Kahne über einen Fluß rudert, so wirkt auf den Kahn die Kraft des Flusses und die Kraft des Ruders; beide bilden einen Winkel. Der Kahn bewegt sich dann in der Richtung der durch das Kräfteparallelogramm bestimmten Diagonale und trifft das jenseitige Ufer dort, wo es die verlängerte Diagonale trifft. Zwei Arbeiter stehen auf zwei Mauern; jeder hält einen Strick, der an einen zwischen den Mauern auf dem Boden liegenden Stein angebunden ist; zieht nun jeder an seinem Stricke in der Richtung desselben, so geht der Stein nach aufwärts in der Richtung der Resultierenden beider Kräfte, und diese wird durch das Kräfteparallelogramm gefunden.

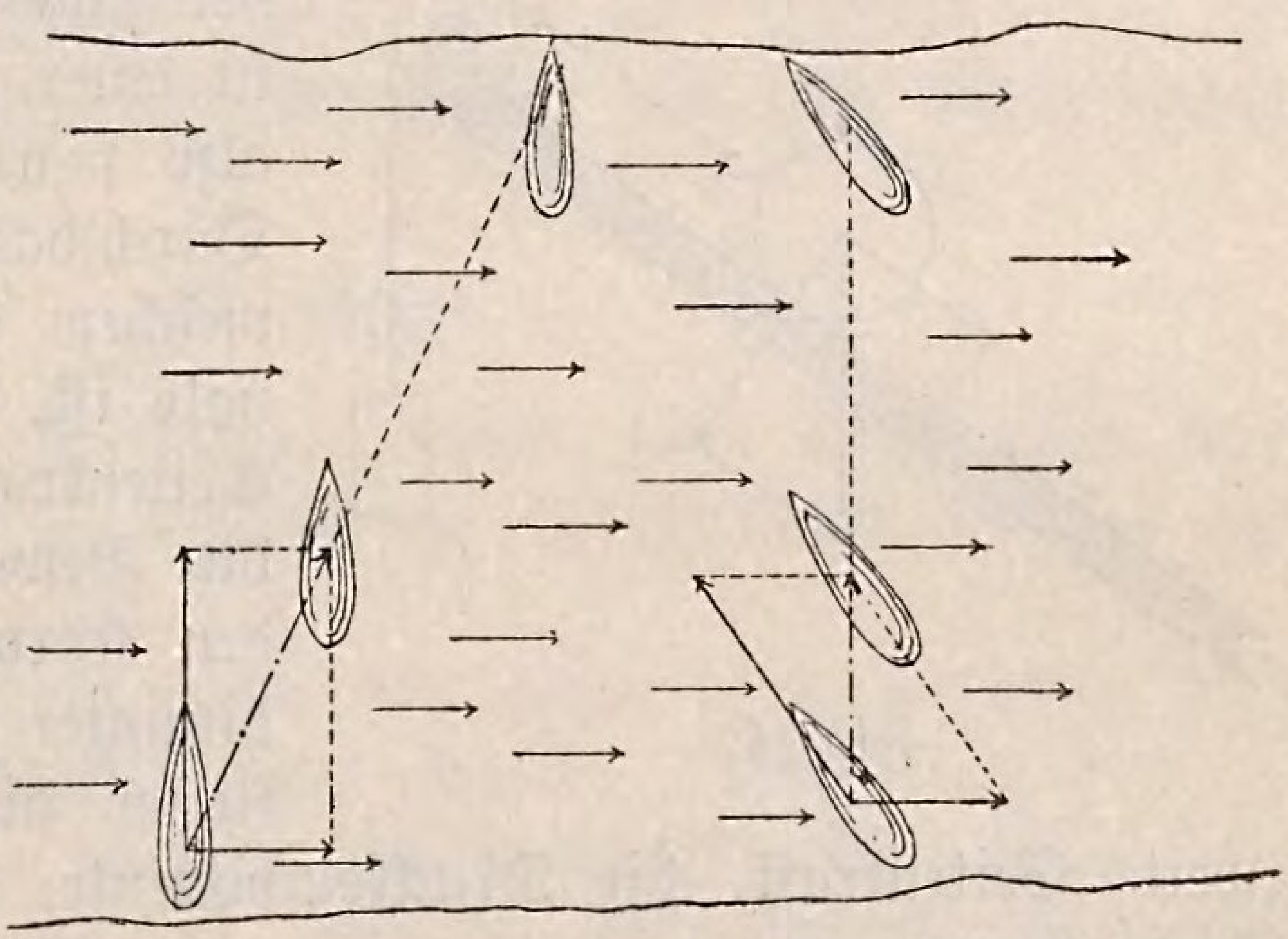


Fig. 3.

Durch Zeichnung des Kräfteparallelogrammes findet man leicht folgende Sätze bestätigt: Wenn die Seitenkräfte gleich groß sind, so halbiert die Resultierende den Winkel derselben; sind sie ungleich, so bildet die Resultierende mit der größeren Kraft den kleineren Winkel. Ist der Winkel zwischen beiden Kräften sehr klein (spitz), so ist die Resultierende verhältnismäßig groß, kann aber höchstens gleich der Summe der beiden Kräfte werden; ist der Winkel sehr

groß (stumpf), so ist die Resultierende klein, kann aber nicht kleiner werden, als die Differenz der beiden Kräfte.

12. Zerlegung der Kräfte.

Es kommt häufig vor, daß sich in der Natur eine Kraft von selbst in zwei Kräfte zerlegt, also zwei Wirkungen zugleich hervorbringt; es sieht dann so aus, als wären an ihre Stelle die zwei Kräfte getreten; auch kann sich eine Kraft in mehrere Kräfte zerlegen. Die Zerlegung folgt denselben Gesetzen wie die Zusammensetzung der Kräfte; die eine Kraft, welche sich zerlegt, spielt die Rolle der Resultierenden, die zwei Kräfte, in welche sie sich zerlegt, sind die Seitenkräfte. Diese Zerlegung tritt insbesondere stets ein, wenn der Körper, auf den die Kraft wirkt, sich nicht in der Richtung bewegen kann, in der die Kraft wirkt. Von den zwei Komponenten wirkt dann die eine in der Richtung, in welcher der Körper sich bewegen kann, die andere in der dazu senkrechten Richtung.

Liegt ein Körper auf einer schiefen Ebene, so wirkt auf ihn die Schwerkraft in vertikaler Richtung; da er sich in dieser Richtung nicht bewegen kann, so zerlegt sich die Schwerkraft in zwei Kräfte; die eine wirkt parallel der schiefen Ebene, die andere wirkt in einer dazu senkrechten Richtung, also senkrecht zur schiefen Ebene. Durch das Kräfteparallelogramm, in welchem die Schwerkraft die Diagonale ist, findet man die Größe der Seitenkräfte. Die erste Seitenkraft, die Bewegungskomponente, bewegt den Körper über die schiefe Ebene hinunter und ist um so größer, je steiler die schiefe Ebene ist. Die zweite Seitenkraft, die Druckkomponente, übt einen Druck auf die schiefe Ebene aus.

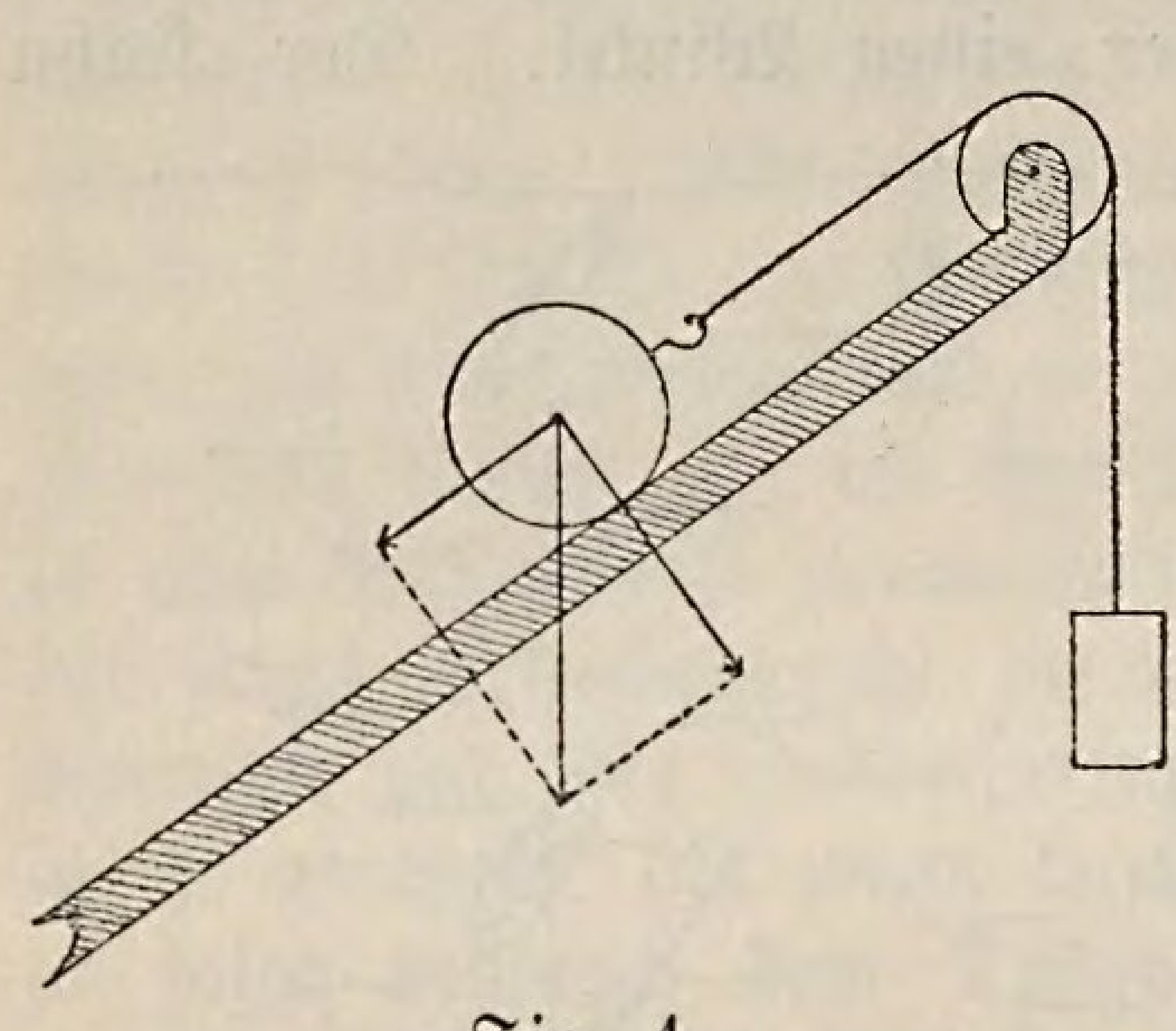


Fig. 4.

Will ich den Körper über die schiefe Ebene hinaufbewegen, so muß ich parallel der Ebene nach aufwärts eine Kraft anbringen, die der ersten Komponente gleich ist, sie also aufhebt, und dazu noch eine Kraft, um die Reibung zu überwinden, die bei mäßiger Steigung ebenso groß ist als bei horizontaler Bahn. Deshalb ist es schwer, einen Wagen auf der steigenden Straße nach aufwärts zu ziehen, und zwar um so schwerer, je steiler die Straße ist. Geht es bergab, so vereinigt sich diese Seitenkraft der Schwerkraft mit der Zugkraft, weshalb letztere nur klein zu sein braucht, damit beide vereinigt die Reibung überwinden. Um Fässer auf einen Wagen

zu bringen, bedient man sich der Schrotleiter, die auch eine schiefe Ebene bildet.

Ein an einem Faden aufgehängtes Gewicht bleibt nur dann in Ruhe, wenn der Faden vertikal hängt. Hängt der Faden schräg, so zerlegt sich die Schwerkraft Q in zwei Komponenten, von denen die eine, P, in der Richtung wirkt, in welcher sich der Körper bewegen kann, und den Körper wirklich in Bewegung setzt, während die andere, S, senkrecht dazu, also in der Richtung des Fadens wirkt und den Faden spannt.

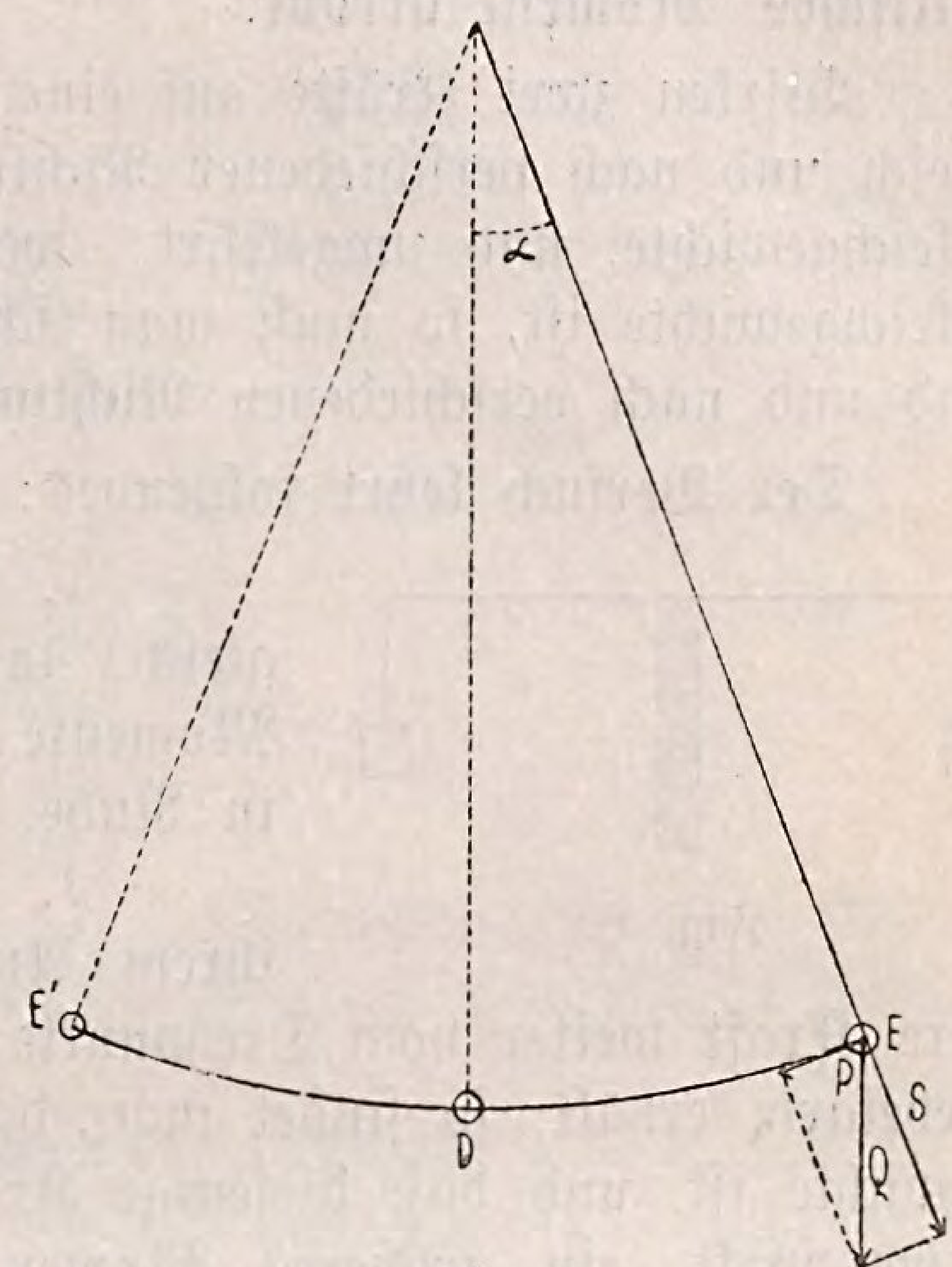


Fig 5.

Weitere Beispiele für solche Kräftezerlegung bieten: ein Wagen oder Schlitten, den man schräg nach vorn zieht, ein Schiff, das man vom Ufer aus mittels eines Seiles stromaufwärts zieht, das Rad an der Drehbank, Nähmaschine oder Lokomotive, das durch eine hin- und hergehende Stange in Umdrehung versetzt wird, u. s. w. Ähnlich ist es beim Segel, bei der Windmühle, bei der Fähre und dem Papierdrachen.

13. Hebel.

Wesentlich andere Wirkungen treten auf, wenn zwei Kräfte nicht an demselben Punkte, sondern an verschiedenen Punkten eines Körpers angreifen.

Der einfachste Fall ist hiebei der, wenn zwei parallele Kräfte an zwei verschiedenen Punkten einer starren Stange angreifen, die in einem Punkte drehbar befestigt oder unterstützt ist. Eine solche Stange heißt dann ein Hebel, und die Entfernungen vom Stützpunkte bis zu den Angriffspunkten der Kräfte heißen die Hebelarme. Jede der beiden Kräfte sucht nun den Hebel zu drehen, und wenn die Kräfte ihn nach verschiedenen Richtungen zu drehen suchen, so kann es wohl kommen, daß sich ihre Wirkungen aufheben, daß sie den Hebel nicht zu drehen vermögen, daß also der Hebel im Gleichgewicht bleibt. Wir untersuchen die Bedingungen, unter denen dies der Fall ist.

Jede Kraft, die nicht am Unterstützungspunkte selbst angreift, sucht den Hebel zu drehen, gibt ihm einen Antrieb zur Bewegung, und diesen Antrieb nennt man ein Moment (movi-

mentum = Antrieb zur Bewegung). **Jede Kraft, die an einem Hebelarme angreift, bringt ein Moment oder Drehmoment, oder statisches Moment hervor.**

Wirken zwei Kräfte auf einen Hebel und sind diese Momente gleich und nach verschiedener Richtung wirkend, so ist der Hebel im Gleichgewichte, und umgekehrt: wenn man sieht, daß der Hebel im Gleichgewichte ist, so muß man schließen, daß die Momente gleich sind und nach verschiedenen Richtungen wirken.

Der Versuch lehrt folgendes:

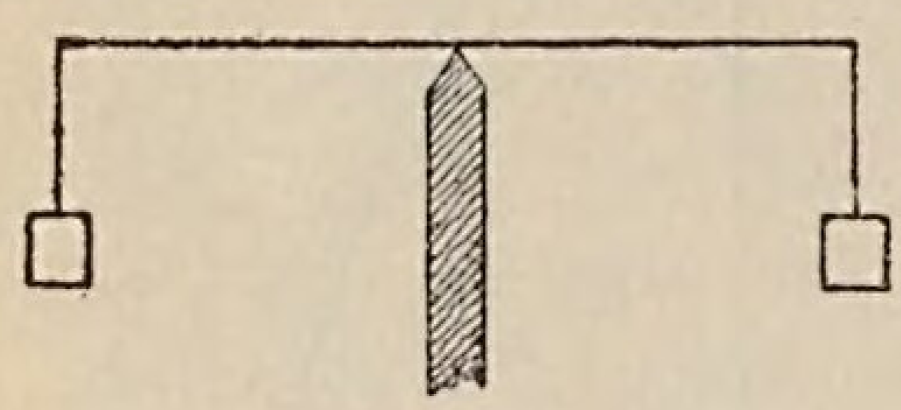


Fig. 6.

1. Wirken zwei gleiche Kräfte an gleich langen Hebelarmen, so sind die Momente gleich; denn der Hebel bleibt in Ruhe.

2. Wenn man die eine Kraft an ihrem Angriffspunkte läßt, aber die andere Kraft weiter vom Drehpunkte entfernt, so daß sie einen längeren Hebelarm erhält, so findet man, daß der Hebel nicht mehr im Gleichgewichte ist, und daß diejenige Kraft, die an dem längeren Hebelarme wirkt, ein größeres Moment hervorbringt. Will man das Gleichgewicht wieder herstellen, so muß man die erste Kraft vergrößern, damit sie auch ein größeres Moment hervorbringt. Wenn man den einen Hebelarm gerade 2 mal länger macht, so findet man, daß man die Kraft am andern Hebelarme auch gerade 2 mal größer machen muß, damit das Gleichgewicht erhalten bleibt. Wenn man den einen Hebelarm dann 3, 4, 5... mal länger macht, so findet man, daß man die Kraft am anderen Hebelarme auch gerade 3, 4, 5... mal größer machen muß, damit das Gleichgewicht erhalten bleibt. Man schließt daraus: j e g r ö ß e r d e r H e b e l a r m i s t, d e s t o g r ö ß e r i s t a u c h d a s M o m e n t, d a s e i n e K r a f t a n i h m h e r v o r b r i n g t; und: j e l ä n g e r d e r H e b e l a r m i s t, d e s t o k l e i n e r muß die an ihm w i r k e n d e K r a f t s e i n, d a m i t d e r H e b e l i m G l e i c h g e w i c h t e i s t.

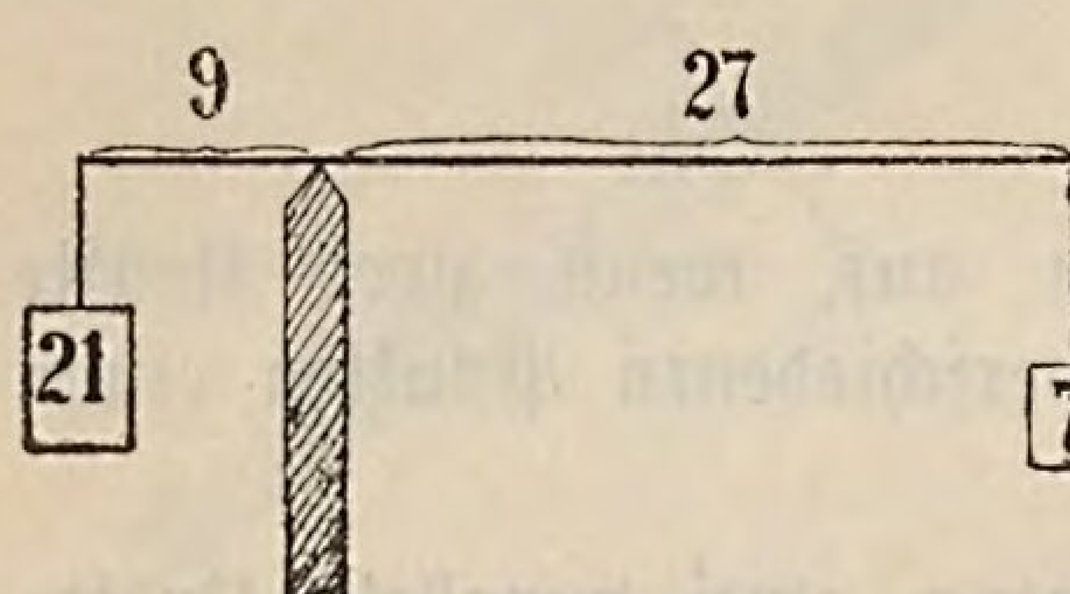


Fig. 7.

Man kann dies Hebelgesetz in Form einer Proportion aussprechen: **Der Hebel ist im Gleichgewichte, wenn die Kräfte sich verhalten umgekehrt wie die Längen der Hebelarme.**

Es ist wichtig zu bemerken, daß hiebei zwei Kräfte, die der Größe nach verschieden sind, doch dieselbe Wirkung haben können, da ja die zwei Kräfte an den beiden Hebelarmen, obwohl an Größe verschieden, doch gleich große Momente hervorbringen, oder daß zwei Kräfte, die einander gleich sind, doch verschiedene Wirkung

haben; denn wenn sie an ungleichen Hebelarmen angreifen, sind die Momente, die sie hervorbringen, um so größer, je länger die Hebelarme sind.

Wirken die zwei Kräfte auf entgegengesetzten Seiten vom Unterstützungspunkte aus und nach derselben Richtung, so heißt der Hebel zweiarmig; wirken die Kräfte auf derselben Seite, so heißt er einarmig; in diesem Falle müssen die Kräfte nach entgegengesetzten Richtungen wirken, also die eine etwa abwärts, die andere aufwärts, über die Größe der hervorgebrachten Momente gelten jedoch dieselben Gesetze, oder: die Kräfte müssen sich verhalten umgekehrt wie die Hebelarme; man beachte, daß jeder Hebelarm vom Unterstützungspunkte aus zu messen ist. Der einarmige Hebel wird auch Druckhebel oder Drücker genannt.

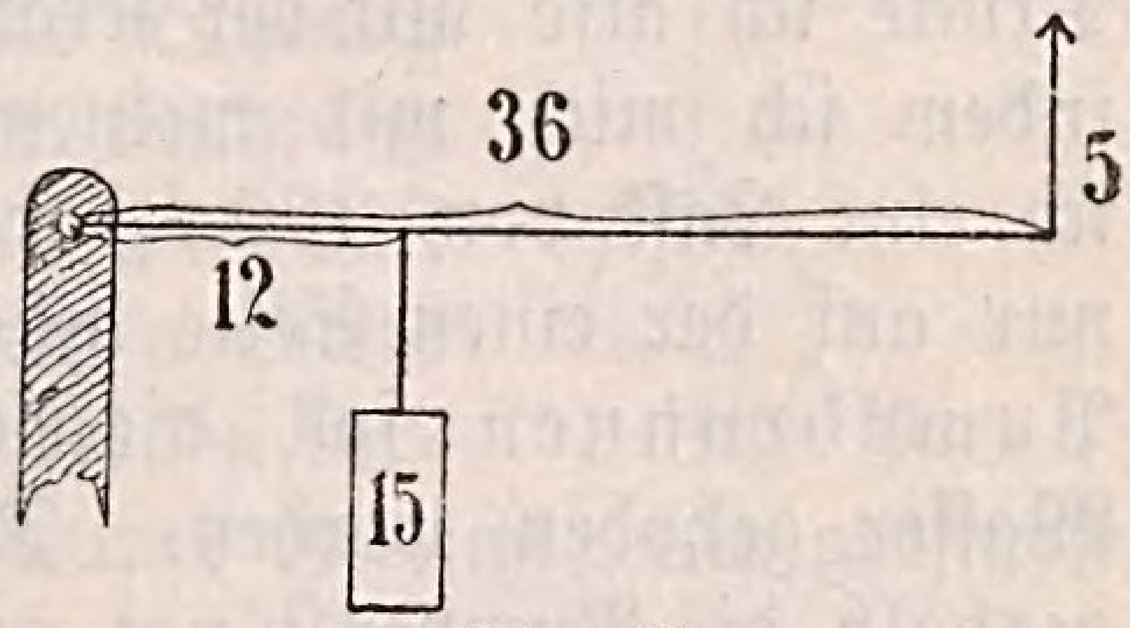


Fig. 8.

Winkelhebel. Die Hebelstange braucht nicht gerade zu sein, sie kann auch gebogen sein oder einen Winkel bilden; es brauchen auch die Kräfte nicht in derselben Richtung zu wirken, wenn sie nur so wirken, daß sie den Hebel nach entgegengesetzten Richtungen zu drehen versuchen. In jedem solchen Falle nennt man den Hebel einen Winkelhebel, und es gilt für ihn dasselbe Gesetz, wenn man unter Länge eines Hebelarmes versteht die Länge der Senkrechten, die man vom Stützpunkte auf die Richtung der Kraft fällt.

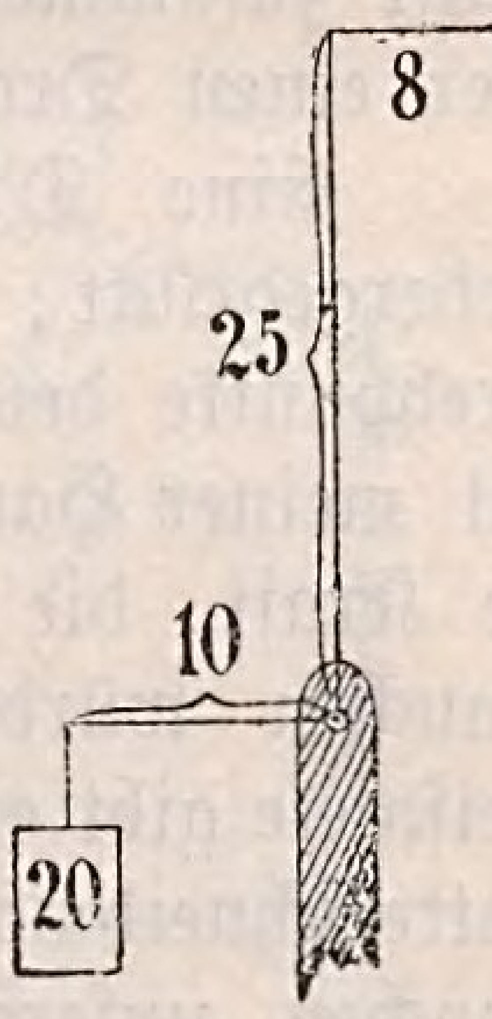


Fig. 9.

14. Anwendung des Hebels.

Der Hebel findet die mannigfachste Verwendung, um eine Last, die für unsere Kraft zu groß ist, durch eine kleinere Kraft zu heben.

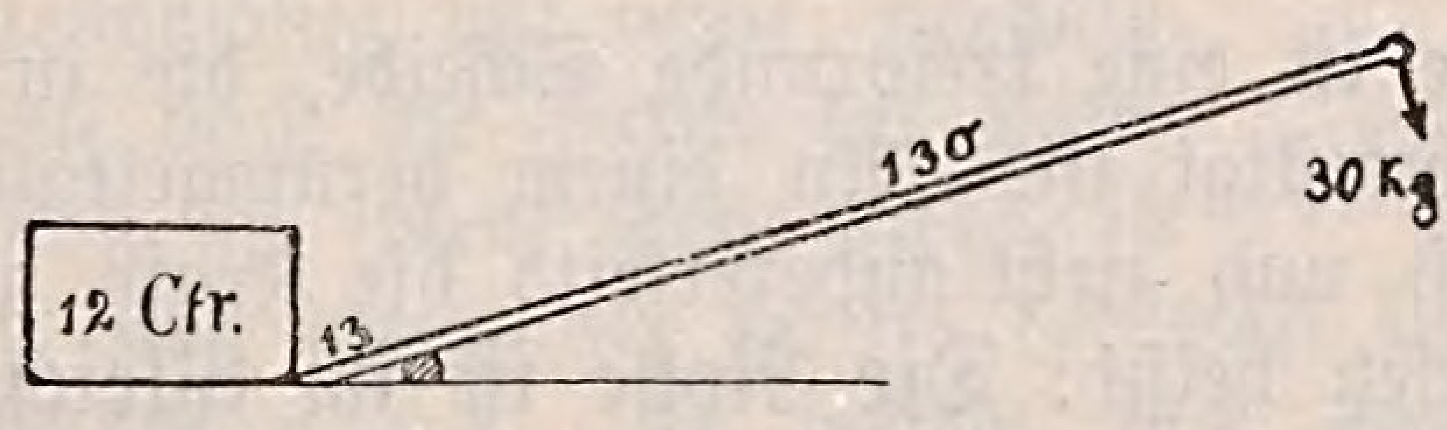


Fig. 10.

Beispiele. Das Hebeeisen: es ist eine lange eiserne Stange (1—2 *m*), unten in eine Schneide auslaufend und wohl auch etwas gekrümmt (Geisfuß); man benützt es, um schwere Steine etwas zu heben; man schiebt die Stange mit dem untern Ende etwas unter

den Stein, indem man sie schief hält und drückt ein Stück Holz oder Stein nahe an das untere Ende, so daß es den Stützpunkt des Hebels bildet; drückt man nun mit der Hand das obere Ende der Stange abwärts, so hebt das untere Ende den Stein etwas in die Höhe. Ist dabei etwa der lange Arm der Stange 10 mal länger als der kürzere, so darf die Last 10 mal größer sein als die Kraft. Drücke ich also mit der Kraft von etwa 30 *kg* auf das obere Ende, indem ich mich mit meinem Körper teilweise darauflege, so kann ich eine Last von 300 *kg* heben, also darf der Stein, da ich ihn nur auf der einen Seite hebe, 600 *kg* = 12 Ztr. schwer sein. Am Pumpbrunnen soll die schwere Pumpenstange und zugleich das Wasser gehoben werden. Diese Last ist mir zu groß; ich hänge deshalb die Pumpenstange an einen kurzen Hebelarm und ziehe selbst an einem langen Hebelarme, so ist die Kraft, die ich dort brauche, viel kleiner (5—10 mal). Bei der Beißzange drückt man die Griffe mit der Hand zusammen, um dadurch deren Backen mit viel größerer Kraft zusammenzudrücken, so daß sie dann einen Nagel festhalten oder einen Draht abzwicken.

Eine Druckpumpe wird durch einen einarmigen Hebel niedergedrückt; der Kolben ist mittelst der Kolbenstange nahe am Drehpunkte des Hebels angebracht, also an einem kurzen Hebelarme; mit meiner Hand drücke ich also am langen Hebelarme, folglich ist die Kraft, die ich dort brauche, viel kleiner als die Kraft, die ich brauchen würde, um den Kolben selbst niederzudrücken. Solche Beispiele gibt es noch viele: Schere, Brecheisen, Schlüssel, Thürklinke, Futterschneidmaschine u. s. w. beruhen alle auf dem Hebel; auch die Knochen unserer Gliedmaßen dienen als Hebel. Beim Glockenzug werden viele Winkelhebel verwendet, um der Kraft eine andere Richtung zu geben. Schaufel und Hacke liegen als Hebel in unseren Händen, Messer, Gabel und Löffel, Schreibstift und Kaffeetasse liegen beim Gebrauch als Hebel zwischen den Fingern.

15. Rolle und Flaschenzug.

Eine Rolle ist eine kreisrunde Scheibe, die in ihrem Mittelpunkte drehbar befestigt ist. An einem herumgelegten Seile hängt einerseits die Last und zieht andererseits die Kraft, um die Last zu heben. Das Gesetz heißt: **Die Rolle ist im Gleichgewichte, wenn Kraft und Last einander gleich sind.** Man kann die Rolle ansehen als einen zweiarmigen Hebel; ihr Mittelpunkt ist der Stützpunkt; die Punkte, an welchen das Seil die Rolle eben noch berührt, sind die Angriffspunkte von Kraft und Last; die zu diesen Punkten führenden Radien sind die Hebelarme. Da diese Hebelarme gleich sind, müssen auch die Kräfte gleich sein.

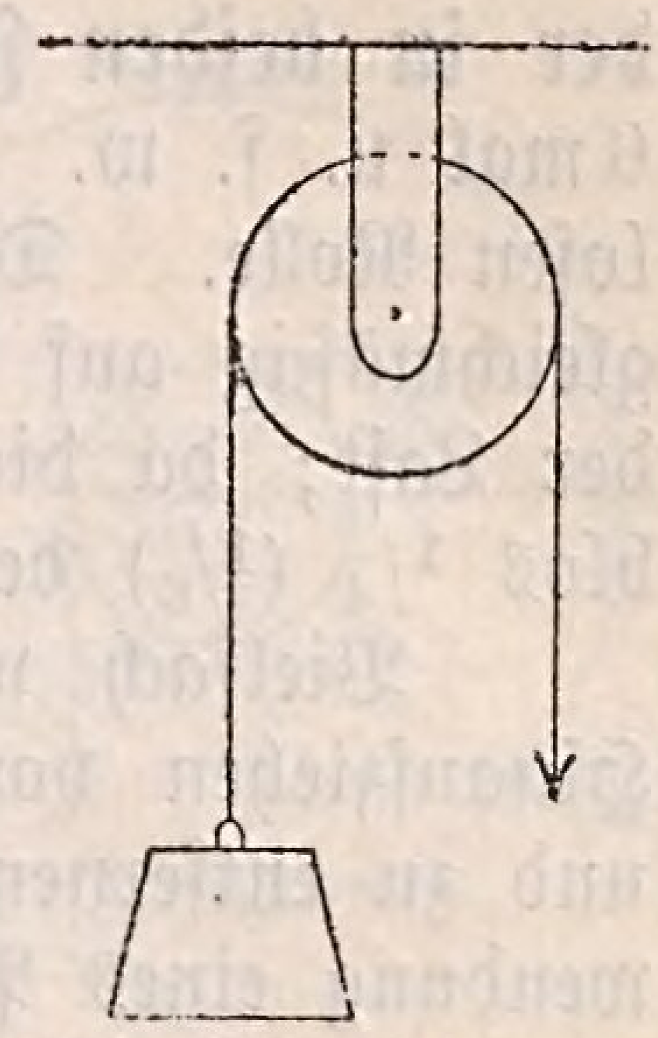


Fig. 11.

Die Seile müssen nicht gerade parallel sein, sondern können beliebige Richtungen haben; gleichwohl bleibt das Gesetz dasselbe; denn die Rolle ist dann als Winkelhebel anzusehen, dessen Hebelarme auch einander gleich sind.

Die feste Rolle dient nicht dazu, einen Kraftgewinn zu erzielen, sondern bloß um die Richtung der Kraft zu verändern, ihr eine bequemere Richtung zu geben. So wird sie angewandt, um eine Last emporzuziehen, indem man an dem Seile abwärts zieht. Eine Zusammenstellung mehrerer Rollen verwendet man oft, um durch ein herabsinkendes Gewicht eine geöffnete Hausthüre selbstthätig zu schließen.

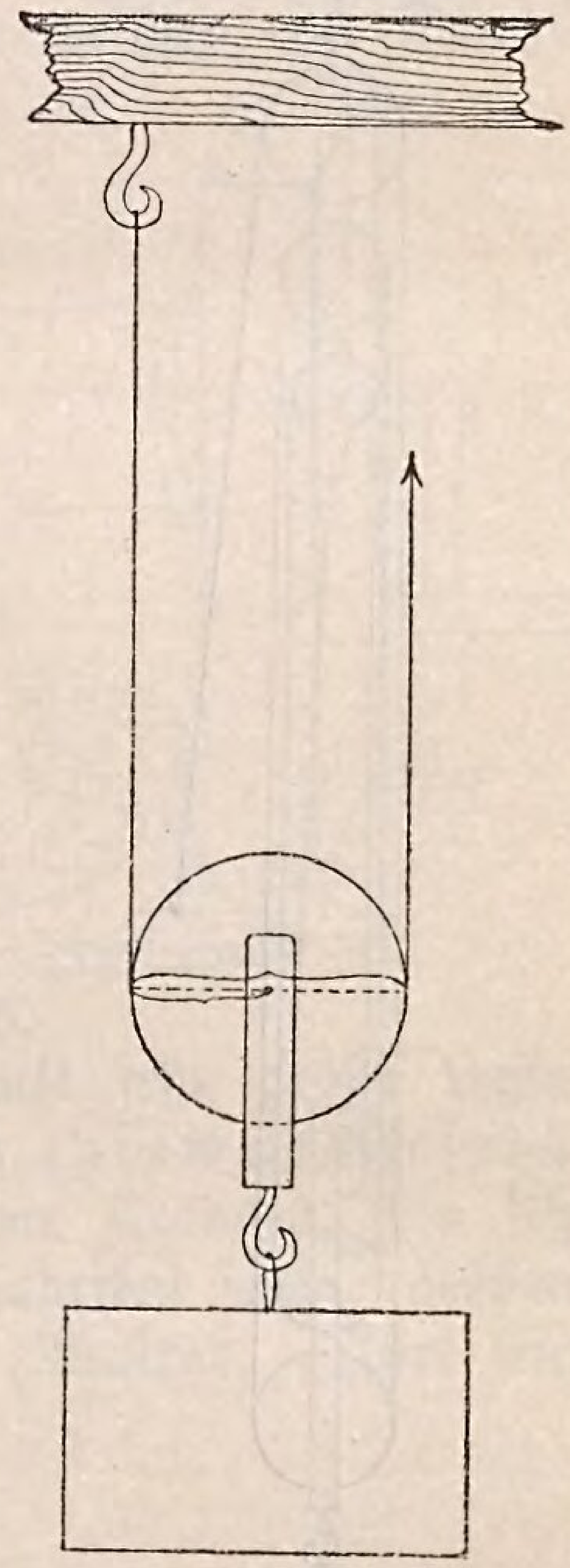


Fig. 12.

Die lose Rolle. Sie besteht aus einer Rolle, welche sich in einem Bügel dreht; am Bügel ist die Last befestigt; die Rolle hängt dabei in einem Seile, dessen eines Ende oben festgemacht ist, und an dessen anderem Ende die Kraft nach aufwärts wirkt, um die am Bügel hängende Last zu heben; beide Teile des Seiles sind parallel. Man leitet wohl auch den freien Teil des Seiles noch über eine feste Rolle und läßt dann die Kraft nach abwärts wirken. Die lose Rolle kann als ein einarmiger Hebel aufgefaßt werden. Der Berührungspunkt des festen Seiles ist der Stützpunkt, die Mitte der Rolle ist der Angriffspunkt der Last, der Berührungspunkt des freien Seiles ist der Angriffspunkt der Kraft; daraus folgt; **die lose Rolle ist im Gleichgewichte, wenn die Kraft gleich ist der Hälfte der Last.**

Man kann sich das Gesetz auch so erklären: die Last hängt in zwei Seilen; verteilt sich also gleichmäßig auf beide; deshalb trifft auf ein Seil bloß die Hälfte der Last; da die Kraft bloß an einem Seile zieht, so braucht sie auch bloß gleich der Hälfte der Last zu sein.

Der Flaschenzug. Er besteht aus mehreren festen und losen Rollen, die in zwei Hülsen (Flaschen) drehbar befestigt sind; es enthält jede Flasche gleich viele, etwa drei Rollen. Die obere Flasche hängt an einem Gerüste, an die untere ist die Last angehängt, und beide Flaschen sind nun durch ein Seil verbunden (eingefädelt) das so geführt ist, wie aus der Figur 13 zu ersehen ist. **Die Kraft ist so vielmal kleiner als die Last, als die Anzahl**

der in beiden Flaschen befindlichen Rollen beträgt, also 4 mal, 6 mal u. s. w. Man erklärt sich dieses Gesetz ähnlich wie bei der losen Rolle. Die Last hängt in 4 (6) Seilen und verteilt sich gleichmäßig auf dieselben; also trifft auf jedes Seil bloß $^1/_4$ ($^1/_6$) der Last; da die Kraft bloß an einem Seile zieht, so braucht sie blos $^1/_4$ ($^1/_6$) der Last zu sein.

Vielfach wird der Flaschenzug angewandt bei Bauten zum Hinaufziehen von Baumaterial, da er überall leicht anzubringen und zu entfernen, eine einfache Maschine ist, und häufig die Verwendung eines Pferdes gestattet.

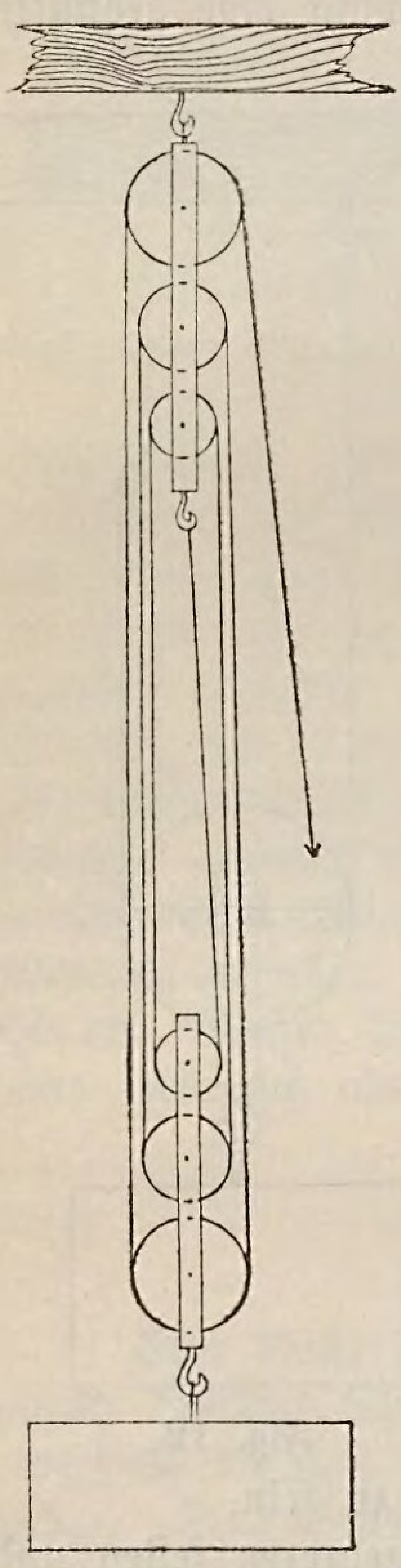


Fig. 13.

16. Wellrad.

Das Wellrad besteht aus der Welle und dem darauf befestigten Rade. Die Welle ruht mit Zapfen drehbar in den Zapfenlagern; um sie schlingt sich ein Seil, das am herabhängenden Ende die Last trägt, die man emporziehen will. Die Kraft greift am Umfange des Rades an, um durch Drehen desselben die Last zu heben. Die Last wirkt also am Ende des Radius der Welle, senkrecht zum Radius, und sucht das Wellrad nach der einen Seite zu drehen; die Kraft wirkt am Ende des Radius des Rades, senkrecht zum Radius, und sucht das Wellrad nach der andern Seite zu drehen. Kraft und Last bringen also Momente hervor wie die Kräfte an einem Hebel; es gilt also auch das Hebelgesetz, das man hier so aussprechen kann: **die Kraft verhält sich zur Last wie der Radius der Welle zum Radius des Rades,** oder: sovielmal der Radius der Welle kleiner ist als der Radius des Rades, sovielmal muß die Kraft kleiner sein als die Last, damit das Wellrad im Gleichgewichte ist.

Das Wellrad findet mannigfache Anwendung.

Die Erdwinde (Fig. 15) wird angewandt, um Erde, Sand und Kies aus Gruben oder Wasser aus dem Brunnen heraufzuziehen. Anstatt des Rades ist dabei oft bloß eine einzige Speiche (Radius) desselben vorhanden (Kurbel), die am Ende mit einem Handgriffe versehen ist; oder es sind zwei gekreuzte Stäbe angebracht (Drehkreuz).

Die Kraft ist dabei nur 2 bis 5 mal kleiner als die Last, weil man weder die Seiltrommel zu dünn machen darf, da sich sonst das Seil nicht vollständig aufwickeln könnte, noch die Kurbel zu lang, da man sonst nicht bequem daran drehen kann.

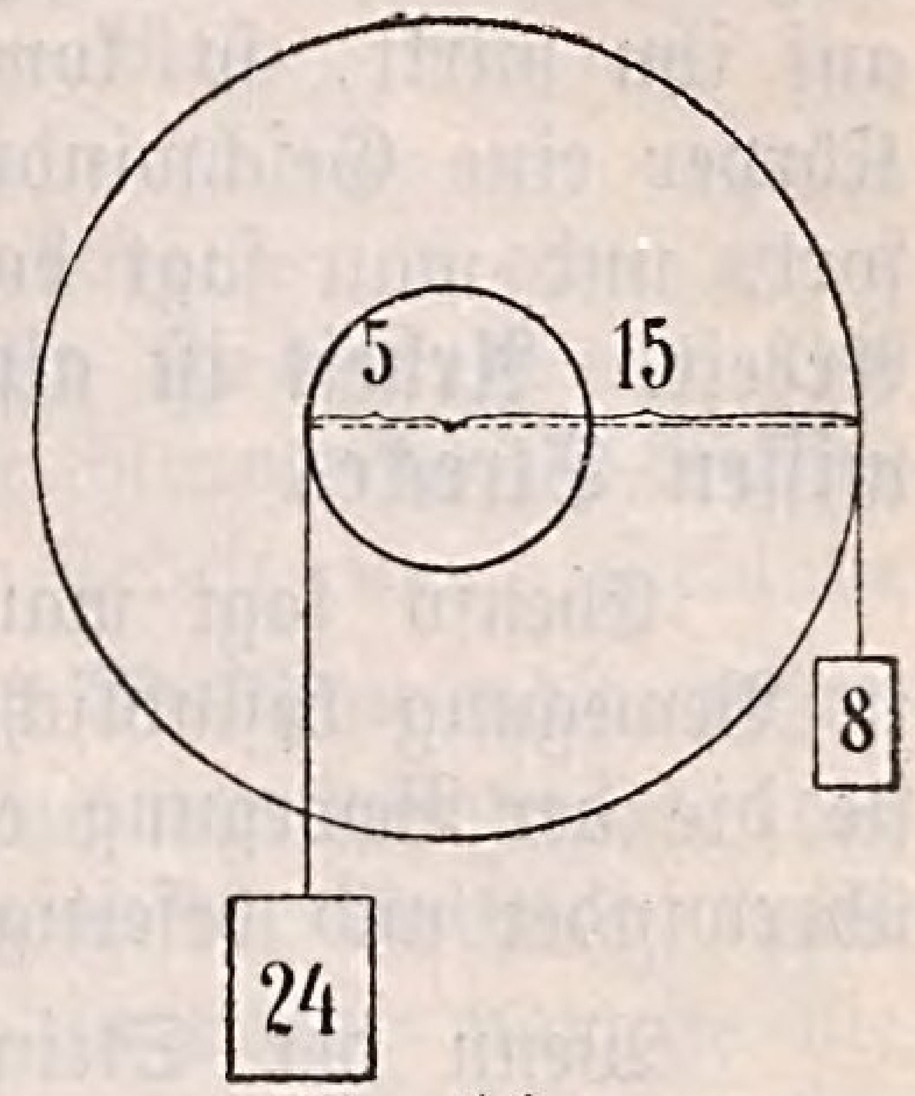
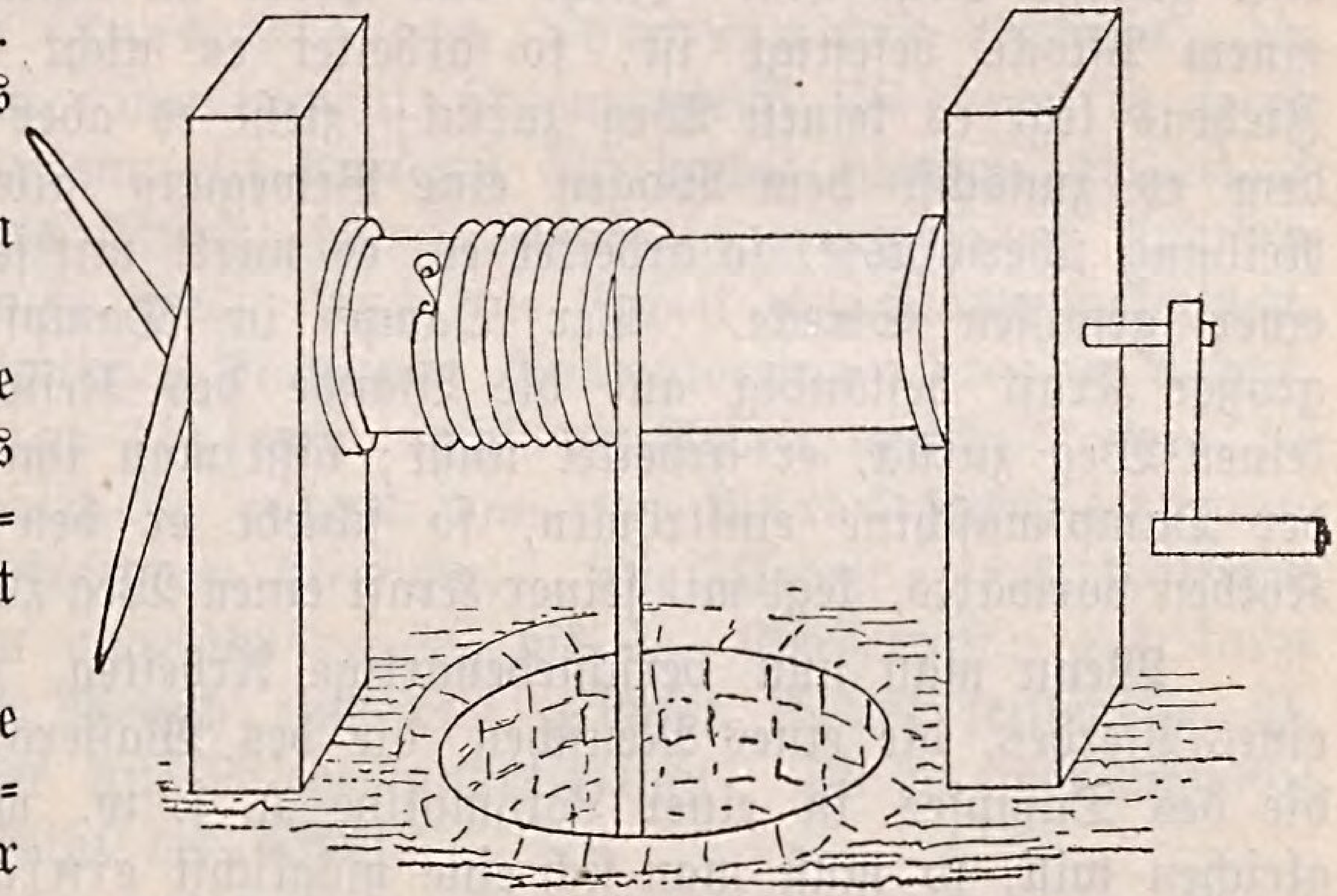


Fig. 14.

Bei Bergwerken hat man, um die Stoffe und die Bergleute aus dem Schachte heraufzuziehen (zu fördern), eine ähnliche Vorrichtung, die Fördermaschine. Das Seil trägt die Förderschale und wickelt sich, da es oft sehr lang ist, um eine Welle von großem Durchmesser; diese wird umgedreht durch eine Kurbel, an welcher eine Dampfmaschine angreift. Aehnlich ist es beim Pferdegöppel und beim Mühlrad.


Fig. 15.

Will man die Wirkung eines Wellrades verstärken, so nimmt man mehrere Wellräder, die durch Zähne passend in einander eingreifen und es ermöglichen, daß man mit sehr kleiner Kraft sehr große Lasten heben kann; solche Maschinen heißen sodann zusammengesetzte Räderwerke. Manche Aufzugswinden, der Krahnen, die Uhr und all die vielen Zahnräder, die wir in Fabriken sehen, gehören hieher und beruhen alle auf dem einfachen Wellrad. Ihre Einrichtung wird später besprochen werden.

17. Von der Arbeit.

Unter Kraft versteht man, wie früher gesagt, jede Ursache, welche einem Körper eine Bewegungsänderung geben kann. Wenn der Körper sich nicht bewegen kann, weil ein Hindernis die Bewegung unmöglich macht, so äußert sich die Kraft nur als Zug oder Druck; man sagt dann wohl, die Kraft ruht. Ist aber kein solches Hindernis vorhanden, so daß der Körper sich frei be-

wegen kann, frei wenigstens in der Richtung, in welcher die Kraft auf ihn wirkt, so kommt die Kraft zu Wirkung; sie erteilt dem Körper eine Geschwindigkeitsänderung, schiebt ihn eine Strecke weit fort, und man sagt dann, die Kraft arbeitet oder leistet eine Arbeit. **Arbeit ist also die Wirkung einer Kraft längs einer gewissen Strecke.**

Ebenso sagt man, eine Kraft arbeitet, wenn sie einen schon in Bewegung befindlichen Körper dadurch in Bewegung erhält, daß sie die der Bewegung entgegenstehenden Hindernisse und Widerstände überwindet und beseitigt.

Wenn der Steinträger die Last auf dem Rücken hat und stehen bleibt, so arbeitet er nicht, er ruht; wenn er sie aber auf das Baugerüst hinaufträgt, so arbeitet er, seine Kraft wirkt auf eine gewisse Höhe hin. Zieht das Pferd an einem Seile, das an einem Pflocke befestigt ist, so arbeitet es nicht, denn trotz allen Ziehens legt es keinen Weg zurück; zieht es aber am Wagen, indem es zunächst dem Wagen eine Bewegung gibt und dann die Reibung überwindet, so arbeitet es, es wirkt mit seiner Kraft längs einer gewissen Strecke. Der Dampf im Dampfkessel drückt mit großer Kraft beständig auf die Wände des Kessels, aber er legt keinen Weg zurück, er arbeitet nicht; läßt man ihn in den Cylinder der Dampfmaschine einströmen, so schiebt er den dort befindlichen Kolben vorwärts, legt mit seiner Kraft einen Weg zurück und arbeitet.

Wenn man nun verschiedenartige Arbeiten, z. B. die Arbeit eines Pferdes, die eines Menschen, die des Wassers in einer Mühle, die des Dampfes in einer Lokomotive u. s. w. mit einander vergleichen will, so muß man sich eine möglichst einfache Arbeit auswählen, und mit dieser alle andern Arbeiten vergleichen, also sie damit messen. Eine solche als Einheit gewählte möglichst einfache Arbeit ist das Meterkilogramm, *mkg*, oder Kilogrammeter, *kgm*; das ist die Arbeit, bei der die Krafteinheit, also das *kg*, die Wegeinheit, also 1 *m* zurücklegt. **Ein Kilogrammeter ist die Arbeit, welche 1 *kg* Kraft verrichtet, wenn es längs der Strecke von 1 *m* wirkt.** Die einfachste Vorstellung von 1 *kgm* erhält man, wenn man bedenkt, daß man 1 *kgm* Arbeit verrichtet, wenn man 1 *kg* einen Meter hoch hebt; ebenso arbeite ich 1 *kgm*, wenn ich einen kleinen Wagen, zu dessen Fortbewegung gerade 1 *kg* Kraft nötig ist, 1 *m* weit fortschiebe.

Leicht ist folgendes ersichtlich. Hebe ich nicht bloß 1 *kg*, sondern etwa 6 *kg* 1 *m* hoch, so ist, da ich 6 mal mehr Kraft anwende, auch die Arbeit 6 mal größer, also = 6 *kgm*; hebe ich diese 6 *kg* nicht bloß 1 *m* sondern etwa 5 *m* hoch, so ist, da ich 5 mal mehr Weg zurücklege, auch die Arbeit 5 mal größer = 5 · 6 *kgm* = 30 *kgm*. Man findet demnach die Anzahl der Arbeitseinheiten,

kgm, indem man die Kraft, die in *kg* ausgedrückt ist, mit dem Weg, der in *m* ausgedrückt ist, multipliziert. Also

Arbeit = Kraft · Weg.

Man mißt die Arbeit einer Maschine, wenn man angibt, wie viele *kgm* Arbeit sie in jeder Sekunde leistet. Wenn durch ein Pumpwerk in jeder Minute 450 *l* Wasser 26 *m* hoch gehoben werden, so ist dessen Arbeit in 1 Sekunde $= \frac{450.26}{60} = 195$ *kgm*. Da dies die von der Maschine nach außen wirklich abgegebene Arbeit ist, ohne Rücksicht auf die im Innern der Maschine noch nebenher etwa zur Überwindung der Reibung, zum Bewegen der Ventile 2c. geleistete Arbeit ist, so nennt man sie die wirkliche oder effektive Arbeit oder Leistung der Maschine, oder kurz den Effekt. Der Effekt dieser Maschine beträgt 195 *kgm*.

Unter einer Pferdekraft versteht man nicht die Kraft oder Zugkraft eines Pferdes, sondern die Arbeit, die es verrichten kann; man nimmt sie an gleich 70 *kgm* in jeder Sekunde; so viel kann ein kräftiges Pferd bei schwerer Arbeit 8 Stunden des Tages leisten; jedoch leistet ein gewöhnliches Arbeitspferd kaum halb so viel. Auch die Arbeit von Dampfmaschinen, Wasserkräften, elektrischen Maschinen, Gasmotoren 2c., kurz die Arbeit, welche die Motoren liefern, sowie die Arbeit, welche Arbeitsmaschinen brauchen, rechnet man nach Pferdekräften, setzt aber dabei eine Pferdekraft = 75 *kgm*. Die Arbeit eines kräftigen Mannes setzt man ungefähr = $^1/_5$ bis $^1/_7$ Pferdekraft; auf kurze Zeit kann ja ein Mensch eine viel größere Arbeit leisten, z. B. wenn er rasch über eine Stiege hinaufspringt. Die in einer Sekunde geleistete Arbeit heißt der Effekt.

Ähnlich wie das *kgm* ist definiert: das frühere Fußpfund, die Metertonne = 1000 *kgm*, das engl. Fußpfund, wobei, da 1 *kg* = 2,2 engl. Pfund und 1 *m* = 3,28 engl. Fuß, 1 *kgm* = 2,2 · 3.28 = 7,23 engl. Fußpfund ist.

Wenn im gewöhnlichen Leben eine Arbeit von uns verrichtet werden soll, so ist sie häufig derart, daß sie auf verschiedene Arten geleistet werden kann. So kann man sich, um einen Haufen Schutt fortzuschaffen, eines kleinen oder größeren Karrens bedienen, und man sieht leicht, daß je kleiner die Ladung ist, desto öfter der Weg gemacht werden muß; je kleiner also die Kraft ist, desto größer ist der Weg. **Je größer die Kraft ist, desto kleiner ist der Weg, die Arbeit jedoch ist stets dieselbe.**

Das nämliche Gesetz gilt bei allen Maschinen. Unter Maschine ist zu verstehen eine Vorrichtung, durch welche man im stande ist, eine Arbeit anders zu leisten, als man sie naturgemäß leisten müßte.

So ist der Hebel eine einfache Maschine. Denn wenn ich etwa den Kolben einer Pumpe emporziehen soll, und es ist diese mir aufgetragene Arbeit unbequem, weil meine Kraft zu klein ist,

so befestige ich die Kolbenstange am kurzen Hebelarme und ziehe mit meiner Kraft am langen Hebelarme. Ich verrichte dadurch wirklich die verlangte Arbeit; denn ich hebe den Kolben, dessen Belastung etwa 80 *kg* beträgt, etwa 10 *cm* hoch. Diese Arbeit verrichte ich aber nicht direkt, nicht so, wie sie vorliegt; denn ich ziehe nicht den Kolben selbst in die Höhe; sondern ich ziehe an einem etwa 5mal längeren Hebelarme; ich brauche dort eine 5mal kleinere Kraft, 16 *kg*; soll aber der Kolben 10 *cm* hoch gehoben werden, so muß ich am langen Hebelarme einen 5mal längeren Weg machen, 50 *cm*. Die von mir verrichtete oder aufgewendete Arbeit besteht darin, daß ich die Kraft von 16 *kg* auf eine Strecke von 50 *cm* ausübe; die von mir verlangte oder geleistete Arbeit war: 80 *kg* 10 *cm* hoch zu heben. Beide Arbeiten sind der Größe nach einander gleich; denn $80 \cdot 0{,}1 = 8 = 16 \cdot 0{,}5$ *kgm*. **Die Arbeit der Kraft ist gleich der Arbeit der Last.** Beim Hebel gewinne ich an Kraft; denn die Kraft ist kleiner als die Last; aber ich verliere an Weg; denn der Weg der Kraft ist größer als der Weg der Last, und zwar: **Was man an Kraft gewinnt, geht an Weg verloren.** Da hiebei der längere Hebelarm sich auch mit größerer Geschwindigkeit bewegt als die Last, so kann man auch sagen: was man an Kraft gewinnt, verliert man an Geschwindigkeit oder an Zeit. Dies Gesetz gilt bei allen Maschinen, und man nennt es wegen seiner Allgemeinheit und Wichtigkeit **die goldene Regel der Mechanik.**

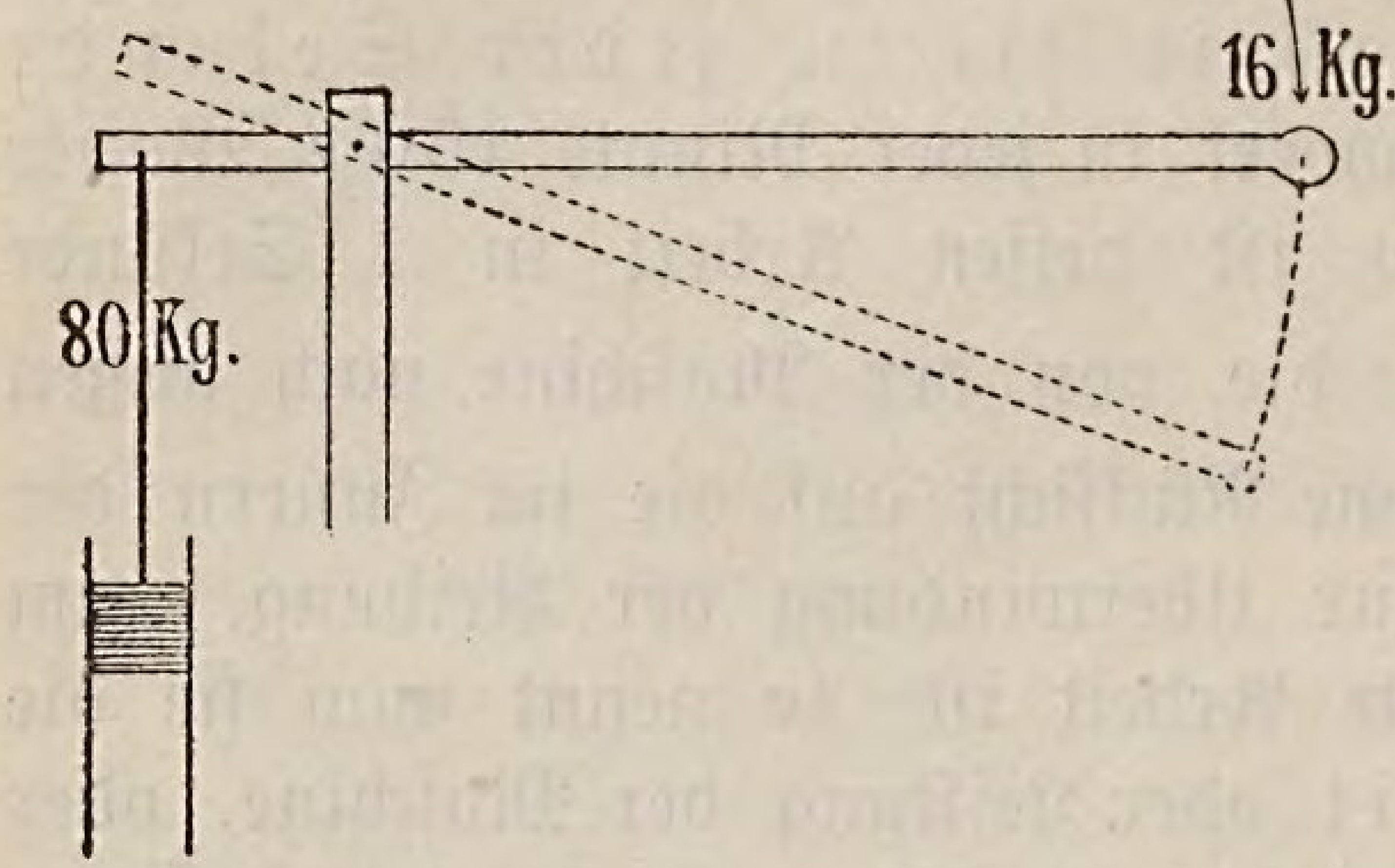


Fig. 16.

Man findet dieses Gesetz beim Wellrad bestätigt: will man die Last um so viel heben, als der Umfang der Welle beträgt, so muß man das Wellrad einmal herumdrehen; die Kraft muß also einen Weg zurücklegen gleich dem Umfange des Rades; dieser ist aber größer als der Umfang der Welle, und zwar ebensovielmal als der Radius des Rades größer ist als der Radius der Welle; ebensovielmal ist aber die Kraft kleiner als die Last. Die Kraft ist also ebensovielmal kleiner, als ihr Weg größer ist.

Benützt man zum Emporheben eines Körpers eine schiefe Ebene, so ist die Kraft kleiner als die Last; dafür ist aber der Weg der Kraft, nämlich die Länge der schiefen Ebene, größer als der Weg der Last, nämlich die Höhe der schiefen Ebene.

Hebel und schiefe Ebene nennt man die einfachen Maschinen; alle anderen werden aus ihnen zusammengesetzt, und wie bei ihnen, gilt bei allen Maschinen die goldene Regel. Besonders leicht ist dies ersichtlich am Flaschenzug; denn hat derselbe in jeder

Flasche etwa 2 (3) Rollen, so ist die Kraft 4 (6) mal kleiner als die Last; dafür muß aber der Weg der Kraft 4 (6) mal größer sein als der der Last; denn um die Last etwa 1 *m* hoch zu heben, muß ich 4 (6) *m* Seil am freien Ende herausziehen. Gerade an diesem Beispiele des Flaschenzuges hat Descartes um 1660 das Gesetz der goldenen Regel zuerst entwickelt. Wir werden später noch sehen, daß dies Gesetz sich durch die ganze Physik hindurchzieht, daß es das wichtigste, keine Ausnahme erleidende Grundgesetz der ganzen Natur ist. Eine Maschine dient demnach nicht dazu, um uns Arbeit zu sparen, sondern wir müssen stets ebensoviel *kgm* leisten als die von uns verlangte Arbeit beträgt, gleichgültig, welche Maschine wir anwenden. Die Maschine dient jedoch dazu, die verlangte Arbeit auf bequemere Weise zu leisten, also etwa die erforderliche große Kraft durch eine kleinere zu ersetzen, oder die erforderliche rasche Bewegung (großen Weg) durch eine langsamere Bewegung (kleineren Weg) zu ersetzen.

18. Zusammensetzung paralleler Kräfte.

Wir haben beim Hebel als einfachsten Fall den betrachtet, wenn zwei parallele Kräfte auf ihn wirken. **Zwei parallele Kräfte haben eine Resultierende, welche im Unterstützungspunkte angreift, parallel den Kräften und gleich ihrer Summe ist.** Denn da der Hebel durch Unterstützung eines Punktes am Fallen gehindert ist, so folgt, daß eine Kraft in diesem Punkte dasselbe leistet wie die zwei gegebenen Kräfte; diese Kraft ist also die Resultierende. Hängt man den durch Gewichte beschwerten Hebel am Stützpunkte auf, anstatt ihn zu unterstützen, so ist diese Schnur auch vertikal, also ist die Resultierende parallel den parallelen Kräften; läßt man diese Schnur über eine Rolle gehen, und untersucht, wie viele Gewichte man an das Ende der Schnur hängen muß, damit der Hebel nicht fällt, so findet man, daß dieses Gewicht, welches der Resultierenden gleich ist, so groß ist als die Summe der beiden vorhandenen Kräfte.

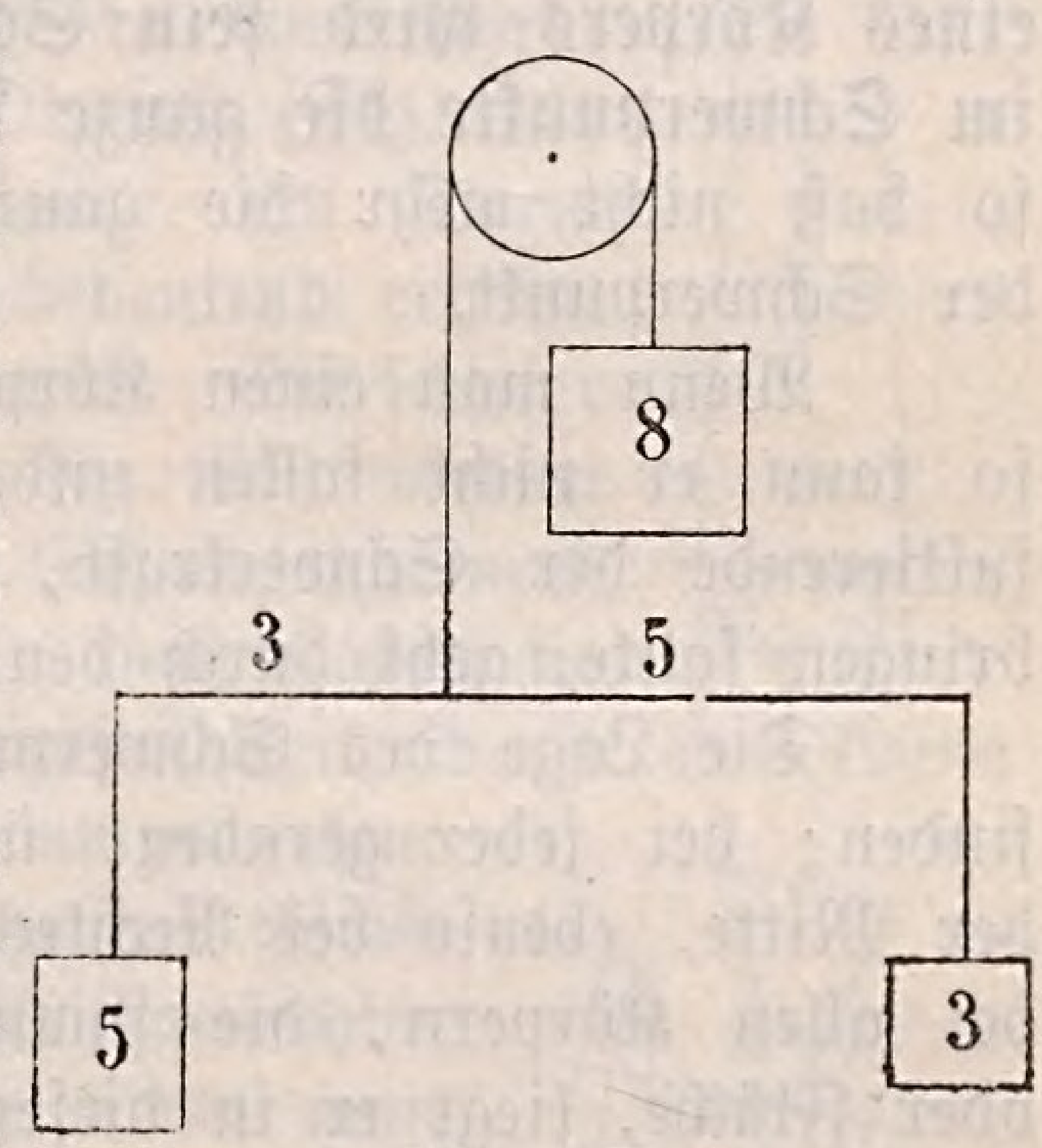


Fig. 17.

Derselbe Satz gilt auch, wenn statt zweier Kräfte mehrere Kräfte wirken; stets haben sie eine Resultierende, die der Summe der vorhandenen Kräfte gleich ist und an einem Punkte angreift, den man auch den Mittelpunkt oder Schwerpunkt der parallelen Kräfte nennt.

Es kann sich auch eine Kraft in zwei oder mehrere parallele Kräfte zerlegen, wenn sie auf einen Körper wirkt, der in zwei oder mehreren Punkten gestützt ist. Ist z. B. eine Stange in zwei Punkten gestützt, und ist in irgend einem dazwischen liegenden Punkte eine Kraft angebracht, so zerlegt sich die Kraft in zwei parallele Kräfte, die auf die beiden Stützpunkte wirken. Die Größen dieser Kräfte berechnen sich aus den zwei Gesetzen: ihre Summe ist gleich der gegebenen Kraft, und ihre Größen verhalten sich umgekehrt wie die Entfernungen ihrer Angriffspunkte vom Angriffspunkte der gegebenen Kraft.

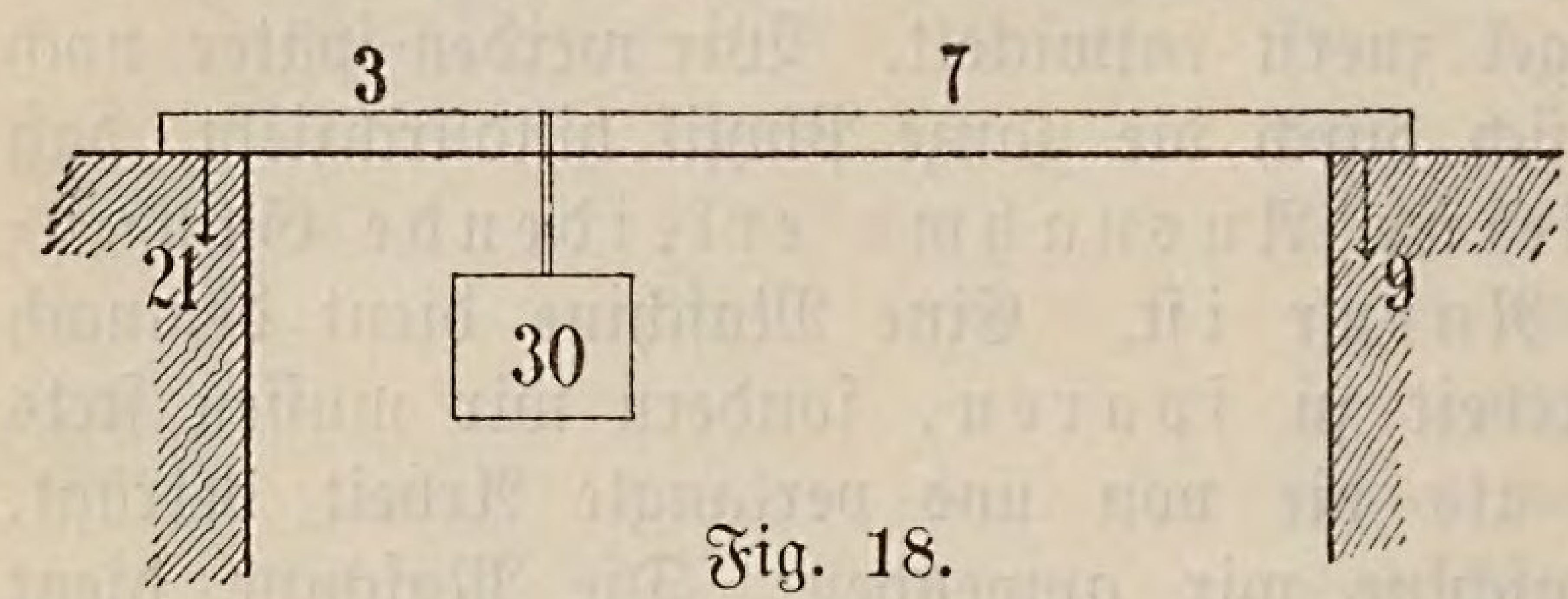


Fig. 18.

19. Schwerpunkt.

Wenn die Schwerkraft auf einen Körper wirkt, so wirkt sie auf *jedes einzelne Teilchen desselben*; man *muß sich also denken, daß jedes Teilchen des Körpers von einer kleinen Kraft, die dem Gewichte desselben entspricht, angegriffen wird*. Diese vielen parallelen kleinen Kräfte haben eine *Resultierende*, die der Summe dieser Kräfte, also dem *Gewichte* des Körpers gleich ist, und in einem gewissen Punkte angreift. **Der Angriffspunkt der Resultierenden der Schwerkräfte eines Körpers wird sein Schwerpunkt genannt. Man kann sich im Schwerpunkte die ganze Masse des Körpers vereinigt denken,** so daß nicht mehr die ganze Masse schwer erscheint, sondern nur der Schwerpunkt.

Wenn man einen Körper in seinem Schwerpunkte unterstützt, so kann er nicht fallen und sich auch nicht drehen; denn die Resultierende der Schwerkraft, die das Fallen und Drehen hervorbringen sollte, geht durch den Unterstützungspunkt.

Die Lage des Schwerpunktes ist in vielen Fällen leicht zu finden; bei jeder geraden, überall gleich dicken Stange liegt er in der Mitte, ebenso bei Rechteck, Parallelogramm, Kreis und Kugel; bei allen Körpern, die symmetrisch sind in bezug auf eine Linie oder Fläche, liegt er in dieser Linie oder Fläche. Z. B. bei einem Halbkreise liegt er auf dem Halbmesser, der auf dem Durchmesser des Halbkreises senkrecht steht, bei einem Schiffe in der mittleren Ebene, die von der Spitze nach hinten geht, bei einem gleichmäßig beladenen Wagen auch in der mittleren Ebene, welche von vorn nach hinten geht, und ähnliches. Im allgemeinen liegt der Schwerpunkt in der Nähe desjenigen Teiles des Körpers, der die größte Masse hat.

Soll ein Körper stehen, so muß er in mindestens 3 Punkten unterstützt sein; dreibeiniger Stuhl, vierbeiniger Tisch; verbindet

man die Unterstützungspunkte durch eine Linie, so begrenzt diese die **Unterstützungsfläche**. Wenn man nun vom Schwerpunkte des Körpers eine vertikale Linie nach abwärts zieht, und wenn diese

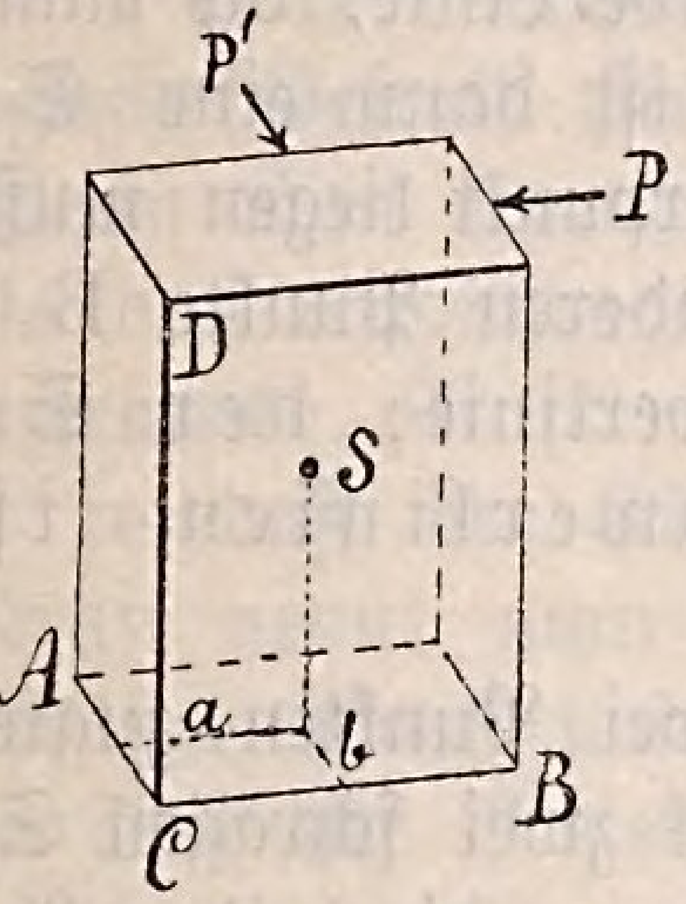


Fig. 19.

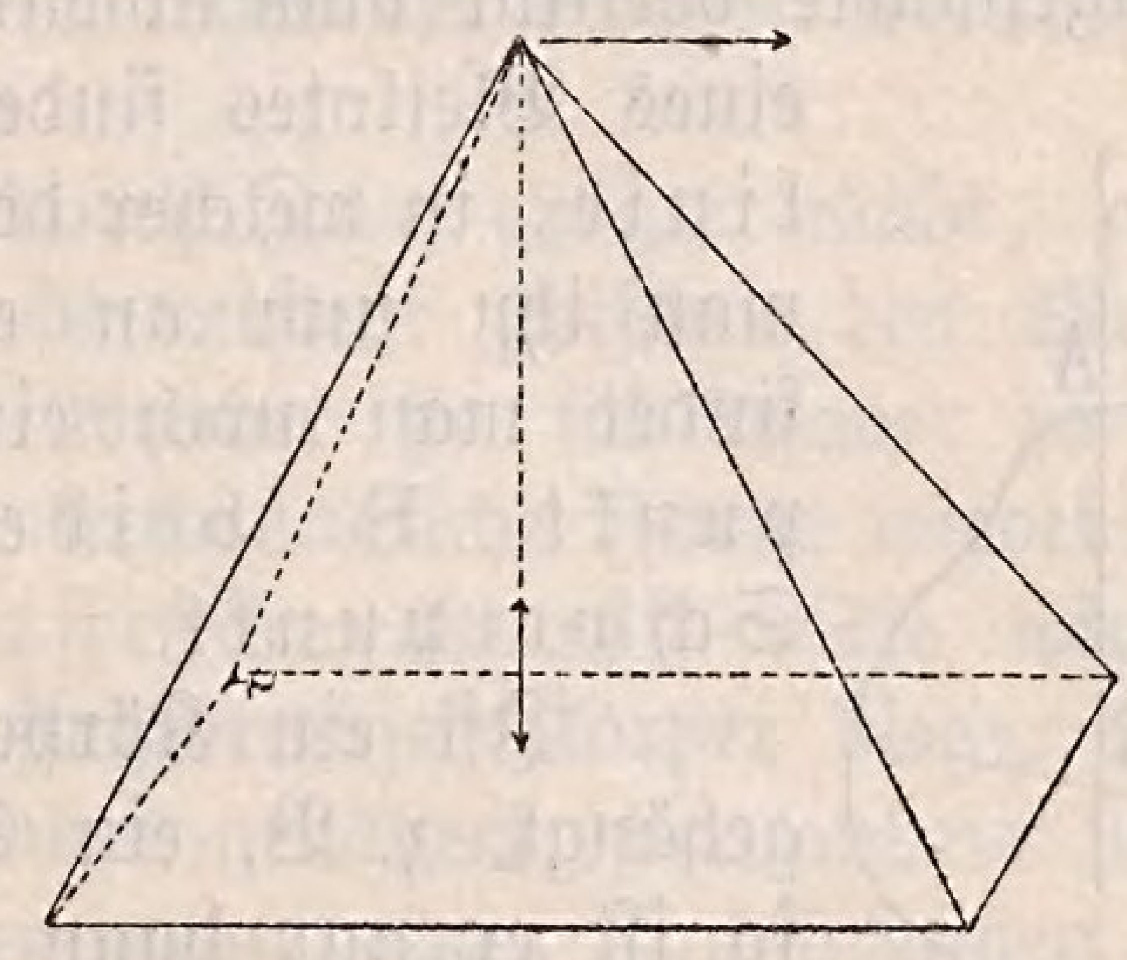


Fig. 20.

vertikale Schwerlinie das Innere der Unterstützungsfläche trifft, so steht der Körper, trifft sie außerhalb der Unterstützungsfläche, so fällt der Körper um.

Wenn der Körper steht, so braucht man eine gewisse Kraft, um ihn umzuwerfen; er hat eine gewisse **Standfestigkeit**; diese ist um so größer, je schwerer der Körper ist, je näher der Schwerpunkt an der Unterstützungsfläche selbst liegt, also je tiefer er liegt, und je weiter er von den Seiten der Unterstützungsfläche entfernt liegt. So hat der Körper in Figur 19 in der Richtung der Kraft P eine größere Standhaftigkeit als in der Richtung der Kraft P', weil $a > b$. Eine Pyramide (Fig. 20) hat eine große, ein Obelisk (Fig. 21) eine geringe Standfestigkeit. Eine Mauer, ein Turm haben geringe Standfestigkeit; sie wird bedeutend erhöht, wenn man den Körper unten breiter macht. Ein schiefer Turm, ein schräg stehender Wagen (Fig. 22) können noch stehen bleiben, wenn die vertikale Schwerlinie noch innerhalb der Unterstützungsfläche trifft; doch haben sie nach dieser Seite hin eine geringe Standfestigkeit, d. h. eine kleine Kraft genügt, sie nach dieser Seite hin umzuwerfen.

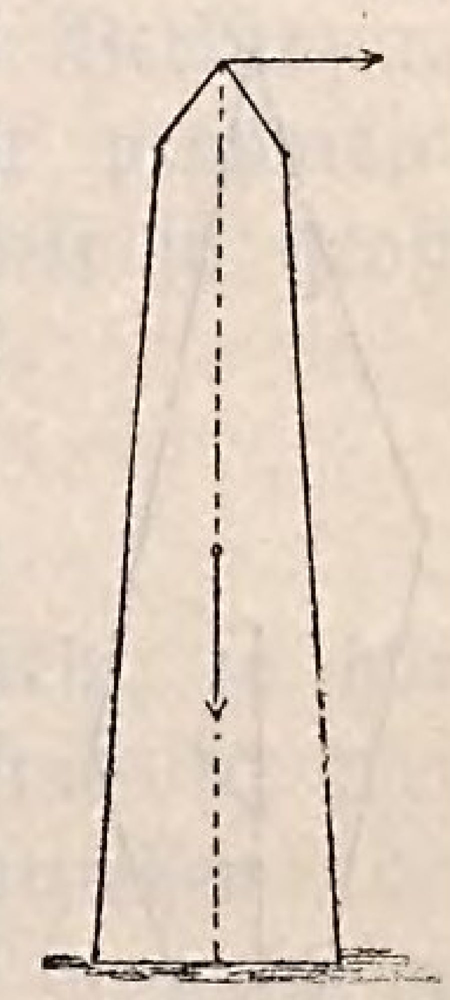


Fig. 21.

Wenn ein Körper auf die angegebene Weise steht, so sagt man, er ist im **stabilen** Gleichgewichte; man erkennt diesen Zustand daran, daß, wenn man den Körper ein wenig aus dieser Lage bringt, er das Bestreben zeigt, in dieselbe zurückzukehren.

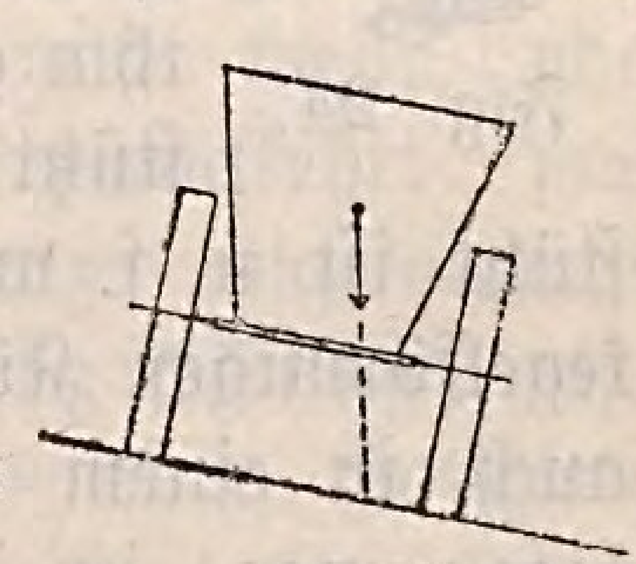


Fig. 22.

Ist ein Körper **aufgehängt**, so kommt er nur dann zur Ruhe, wenn der Schwerpunkt genau senkrecht unter dem Aufhängepunkt liegt; auch ein solcher Körper zeigt, wenn man ihn ein wenig aus dieser Lage bringt, das Bestreben, in die ursprüngliche Lage zurückzukehren, er ist auch im **stabilen** Gleichgewichte.

Weil beim ruhigen Hängen der Schwerpunkt senkrecht unter

dem Aufhängepunkt liegt, so kann man den Schwerpunkt eines unregelmäßigen Körpers auf folgende Weise finden: man hängt den Körper an einem Punkte A auf, bezeichnet sich auf ihm die vom Aufhängepunkte vertikal nach abwärts gehende Linie, die man mittels eines Bleilotes findet: das ist dann eine Schwerlinie, in welcher der Schwerpunkt liegen muß; hängt man ihn nun an einem anderen Punkte B auf, so findet man noch eine Schwerlinie; der Schnittpunkt S beider Schwerlinien ist der Schwerpunkt.

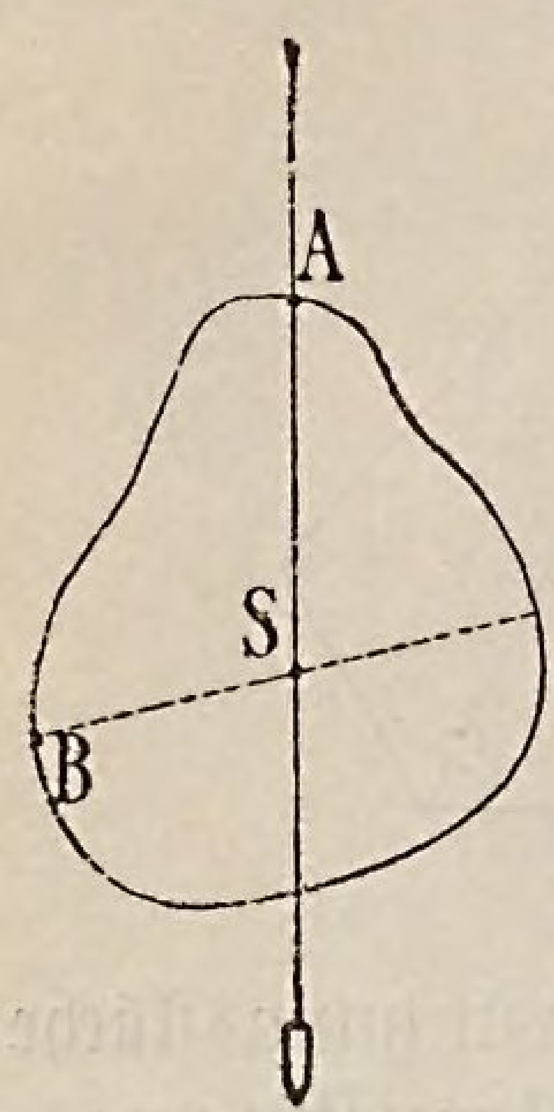


Fig. 23.

Ist ein Körper an zwei Punkten zugleich aufgehängt, z. B. ein Stein an zwei schrägen Schnüren, so ist er nur dann ruhig, wenn die beiden Aufhängepunkte und der Schwerpunkt in einer vertikalen Ebene liegen.

Wenn ein Körper bloß in einem oder in zwei Punkten gestützt ist, so kann er gerade noch stehen bleiben, wenn die vertikale Schwerlinie genau durch den Unterstützungspunkt oder durch die Unterstützungslinie geht. Aber die geringste Kraft reicht hin, den Schwerpunkt etwas bei seite zu schieben, und dann zeigt der Körper keineswegs das Bestreben, in die ursprüngliche Lage zurückzukehren, sondern er fällt ganz um, bis er eine neue Gleichgewichtslage gefunden hat. Ein solcher Körper ist im labilen Gleichgewichte. Will man eine Stange vertikal auf die Fingerspitze stellen und stehend erhalten, so muß man den Finger so bewegen, daß der Schwerpunkt stets vertikal über dem Finger liegt.


Fig. 24.

Wenn ein Körper im Schwerpunkte selbst unterstützt ist, so ist er im indifferenten Gleichgewichte. Wenn man ihm dreht, so zeigt er nicht das Bestreben, in seine ursprüngliche Lage zurückzukehren, er fällt auch nicht um, sondern bleibt ruhig in jeder Lage, die man ihm gibt. Beispiele: ein Rad, das in seiner Mitte unterstützt ist, eine Stange, die in ihrem Schwerpunkte unterstützt ist u. s. w. Wenn eine Kugel, ein Cylinder, eine Walze, ein kegelförmiger Körper auf einer horizontalen Fläche liegen, sind sie auch in einem indifferenten Gleichgewichte; denn wie man sie auch legen mag, in jeder Stellung bleiben sie liegen.

20. Elastizität, Elastizitätsgrenze, Festigkeit.

Zu den allgemeinen Eigenschaften der festen Körper rechnet man auch die Elastizität. Wird ein Körper durch Druck auf ein kleineres Volumen gebracht, so daß die Moleküle einander näher sind als zuerst, so kommt in dem Körper eine Kraft zum Vor=

schein, vermöge welcher die Moleküle sich wieder von einander zu entfernen suchen, vermöge welcher also der Körper sein ursprüngliches Volumen und seine frühere Gestalt wieder anzunehmen bestrebt ist. Hört der Druck auf, so kehrt der Körper wirklich in die ursprüngliche Gestalt zurück.

Wenn man einen Körper durch Zug größer macht, also die Moleküle von einander entfernt, so entsteht zwischen den Molekülen eine anziehende Kraft, vermöge welcher sie sich wieder zu nähern streben, so daß der Körper die ursprüngliche Form wieder erhält. Diese Kraft nennt man die elastische Kraft. Sie wird auch hervorgerufen, wenn man einen stabförmigen Körper biegt, da dann der eine Teil der Moleküle einander genähert, der andere von einander entfernt wird, oder wenn man einen stabförmigen Körper dreht (Torsionselastizität.)

Elastizität ist die Eigenschaft eines Körpers, bei erlittener Formveränderung wieder in die ursprüngliche Form zurückzukehren. Da die Richtung der elastischen Kraft stets der auf den Körper von außen einwirkenden Kraft gerade entgegengesetzt ist, so nennt man sie auch elastische Rückwirkung.

Die Größe der Volumenveränderung ist für die verschiedenen Körper sehr ungleich und hängt auch ab von der wirksamen Kraft; z. B. die Verlängerung eines Stabes durch Zug, die Verkürzung einer Säule durch Druck ist der wirksamen Kraft direkt proportional, wird aber doppelt so groß, wenn man eine doppelt so große Kraft einwirken läßt.

Elastizitätsgrenze.

Wenn man einen Körper zu stark drückt oder zieht, so hört plötzlich die elastische Kraft ganz auf; die Moleküle sind so weit von einander gekommen, daß sie sich gar nicht mehr anziehen; der Körper ist zerrissen: oder die Moleküle sind einander so nahe gebracht, daß sie sich durch die abstoßende Kraft vollständig trennen; der Körper ist zerdrückt; oder die Biegung, die Drehung, die Verlängerung ist so groß geworden, daß der Körper nicht mehr, oder nicht mehr vollständig in die ursprüngliche Gestalt zurückkehrt; man sagt dann, der Körper ist an der Elastizitätsgrenze angekommen, hat dieselbe sogar schon überschritten. Unter Elastizitätsgrenze versteht man also diejenige Größe der Volumen- oder Formveränderung, bei welcher der Körper nicht mehr in die ursprüngliche Größe oder Form zurückkehrt. Man nennt einen Körper gut elastisch, wenn die Elastizitätsgrenze sehr weit entfernt ist, wenn er also auch nach bedeutenden Formveränderungen in die ursprüngliche Form zurückkehrt, z. B. Gummi elastikum, Stahl (die Uhrfedern, Degenklingen), dünne Holzstäbe, u. s. w. Manche Körper haben eine ziemlich nahe liegende Elastizitätsgrenze, sind aber innerhalb der-

selben sehr gut elastisch, z. B. Glas oder Elfenbein kehrt bei kleinen Biegungen vollständig in die ursprüngliche Lage zurück; wird die Biegung aber nur einigermaßen groß, so bricht es entzwei; solche Körper nennt man auch spröde; sehr spröde sind Gips, Thongeschirr, Sandstein, Kolophonium und ähnliche. Wenn die Elastizitätsgrenze sehr nahe liegt, d. h. wenn bei nur sehr geringer Formveränderung der Körper nicht mehr (ganz) in die ursprüngliche Form zurückkehrt, sondern (fast ganz) die neue Form behält, so heißt er schlecht elastisch oder unelastisch. Z. B. Blei, weiches Eisen oder Kupfer, feuchter Thon ꝛc. Es gibt jedoch keine vollständig unelastischen Körper, aber auch keine vollkommen elastischen; auch ein sehr gut elastischer Körper kehrt sogar schon bei geringer Biegung nicht vollständig in die ursprüngliche Lage zurück, doch beträgt diese zurückbleibende Verbiegung bei gut elastischen Körpern nur sehr wenig; dauert jedoch die Wirkung der Kraft auf den Körper sehr lange, so wird diese bleibende Veränderung größer; daher kommt es, daß elastische Stahlfedern im Laufe der Zeit erlahmen, daß die Balken der Zimmerdecke im Laufe der Zeit sich verbiegen ꝛc. Sehr spröde, aber gut elastische Stoffe erscheinen sehr biegsam, wenn sie sehr dünn sind; so kann man dünnen Stahldraht zu einer vielfach gewundenen Spiralfeder aufwickeln und Glas zu so dünnen Fäden ausziehen, daß man sie um den Finger wickeln kann.

Auch flüssige Körper sind in gewissem Sinne elastisch. Wenn man einen flüssigen Körper durch Druck auf ein kleineres Volumen bringt, so kehrt er, wenn der Druck nachläßt, wieder vollständig in die ursprüngliche Größe zurück. Da diese Rückkehr stets eine vollständige ist, so ist bei flüssigen Körpern von einer Elastizitätsgrenze keine Rede, und die flüssigen Körper sind in diesem Sinne vollständig elastische Körper. Inwiefern auch Gase elastisch sind, wird später besprochen werden.

Festigkeit.

Unter Festigkeit versteht man die Kraft, welche ein Körper dem Zerreißen entgegensetzt. Hängt man einen Eisendraht mit dem einen Ende an einen Träger und belastet das andere, untere Ende so stark, bis der Draht zerreißt, und findet man, daß dies bei 223 *kg* geschieht, so sagt man, die Festigkeit dieses Eisendrahtes beträgt 223 *kg*.

Man unterscheidet hiebei drei Arten von Festigkeit:

1. Die absolute Festigkeit, Zugfestigkeit oder der Widerstand gegen das Zerreißen,
2. die relative Festigkeit, der Widerstand gegen das Zerbrechen,
3. die rückwirkende Festigkeit, der Widerstand gegen das Zerdrücken (z. B. bei einer Säule, die von oben gedrückt wird.).

Die absolute Festigkeit beträgt für jeden *qcm* Querschnitt bei:

Tannenholz . .	450—700 *kg*	Stahlblech	7000 *kg*
Buchenholz . .	400—600 „	Kupfer (gewalzt) . .	2100 „
Eschenholz . .	700—900 „	Kupfer (geschlagen) . .	2500 „
Stabeisen (bestes) . .	5000 „	„ (gegossen) . .	1340 „
„ (mittleres) .	3600 „	Zinn	300 „
Eisendraht	7000 „	Zink	600 „
„ (ausgeglüht)	4500 „	Blei	130 „
Gußeisen	1150 „	Hanftau	390 „
Gußstahl	10000 „	Hanfseil	600 „

Die Gesetze der relativen und rückwirkenden Festigkeit können hier nicht besprochen werden.

21. Kohäsion und Adhäsion.

Die Moleküle der festen Körper ziehen sich gegenseitig an; will man also die Moleküle von einander trennen, d. h. den Körper zerreißen so setzt er dem Zerreißen eine gewisse Kraft entgegen. Diese gegenseitige Anziehungskraft der Moleküle nennt man die Kohäsionskraft: man sagt, die Moleküle fester Körper haften an einander vermöge der Kohäsionskraft. Die Kohäsionskraft wirkt aber nur auf sehr kleine Entfernung: wenn man die Moleküle etwas zu weit von einander entfernt, so hört die Kohäsionskraft plötzlich ganz auf, der Körper ist zerrissen. Die Kohäsionskraft ist, wie wir sahen, zugleich die Ursache der elastischen Kraft, sowie der Festigkeit.

Wenn man die zwei Stücke eines zerbrochenen Körpers mit den Bruchflächen zusammenbringt, so ist es nicht möglich, die Moleküle einander so zu nähern, daß die Kohäsionskraft wieder zum Vorschein kommt; man kann also die Stücke eines zerbrochenen Körpers nicht wieder vereinigen durch bloßes Aneinanderhalten oder -drücken.

Wenn man jedoch zwei ganz glatt abgeschliffene Metallplatten an einander bringt, so findet man, daß sie an einander haften, daß jetzt eine Kraft nötig ist, um sie wieder aus einander zu nehmen. Man schließt, daß bei solchen genau abgeschliffenen Platten wenigstens einige Moleküle einander nahe gekommen sind, so daß sie sich, wenn auch nicht mit voller Kohäsionskraft, so doch mit eigener Kraft anziehen: man nennt diese Kraft die Adhäsionskraft. Sie wirkt nicht bloß zwischen Molekülen desselben Stoffes, sondern auch zwischen Molekülen verschiedener Stoffe; es haftet oder adhäriert eine Glasplatte an einer Messingplatte oder Stahlplatte u. s. w. Adhäsion ist die Anziehung zwischen den Molekülen zweier verschiedenen Körper. Die Adhäsion kann sehr kräftig werden, wenn die Moleküle einander sehr stark genähert werden; zwei polierte Glasplatten, auf einander gedrückt, haften so stark, daß es nicht mehr möglich ist, sie zu trennen, außer man

zerbricht sie; wenn man zwei blanke Bleiplatten recht stark zusammendrückt, so nähern sich wegen der Weichheit des Bleies die Moleküle so sehr, daß die Adhäsion übergeht in Kohäsion und die Bleiplatten nicht mehr zu trennen sind, ebenso wenn man eine Kupfer- und eine Silberplatte aufeinanderwalzt.

Zweiter Abschnitt.

Lehre von den flüssigen Körpern.

22. Allgemeine Eigenschaften der flüssigen Körper.

Die Lehre von den flüssigen Körpern heißt Hydraulik, die Lehre vom Gleichgewichte derselben heißt Hydrostatik, die von der Bewegung derselben Hydrodynamik.

Die flüssigen Körper unterscheiden sich von den festen zunächst durch die leichte Verschiebbarkeit ihrer Teilchen. Bei einem festen Körper sind die Teilchen nicht verschiebbar, d. h. im festen Körper haben die Moleküle eine gewisse Lage gegen einander, eine gewisse Anordnung, jedes hat seine bestimmten Nachbarn, und man ist nicht im stande, diese Lage zu verändern, so daß die Anordnung eine andere würde und ein Teilchen andere Nachbarn erhielte. Man kann wohl die Teilchen einander etwas nähern oder sie etwas von einander entfernen oder durch Biegung des Körpers aus einer geraden Anordnung der Moleküle eine krummlinige machen, aber all dies nur in sehr geringem Maße, sonst wird die Elastizitätsgrenze überschritten und der Zusammenhang der Teilchen hört ganz auf.

Wesentlich anders ist es bei den flüssigen Körpern; man kann den Teilchen leicht jede beliebige Anordnung geben, durch Umrühren der Flüssigkeit bekommen die Teilchen immer andere und andere Nachbarn und zeigen dann keineswegs das Bestreben, in die ursprüngliche Lage zurückzukehren. Die Teilchen lassen sich leicht von einander trennen, und vereinigen sich beim Zusammenbringen wieder so vollständig wie zuerst. Die Kohäsion flüssiger Teilchen ist wesentlich kleiner als die der festen Teilchen; sie kann durch sehr kleine Kraft aufgehoben werden, und leicht kommen die Teilchen wieder so nahe an einander, daß die Kohäsionskraft wieder ganz vorhanden ist. Man sagt daher: Flüssige Körper befinden sich in einem anderen Aggregatszustande als feste Körper und nennt ihn den flüssigen Aggregatszustand. Beim festen Aggregatszustande befinden sich die Moleküle im stabilen Gleichgewichte, beim flüssigen Aggregatszustande im indifferenten Gleichgewichte.

Die Schwerkraft allein genügt, die Verschiebung der Teilchen hervorzubringen; denn wenn man Wasser in ein Gefäß schüttet, so nimmt es durch den Druck der Schwere die Form des Gefäßes an und erfüllt alle Teile des Gefäßes: **ein flüssiger Körper hat keine selbständige Gestalt** sondern nimmt die Form des Gefäßes an, in dem er sich befindet.

Wenn man einen festen Körper in eine Flüssigkeit taucht und wieder herauszieht, so bleibt meistens etwas Flüssigkeit an der Oberfläche hängen, die Flüssigkeit benetzt den Körper. So benetzt Wasser fast alle Körper, mit Ausnahme von Fett und Öl; Quecksilber jedoch benetzt nur wenige Metalle wie Kupfer, Silber, Gold, Blei, Zinn, Zink, es benetzt aber nicht das Eisen und die nichtmetallischen Körper, wie Glas, Holz u. s. w. Eine Flüssigkeit benetzt einen Körper, wenn die Adhäsionskraft zwischen dem festen und flüssigen Körper stärker ist als die Kohäsion des flüssigen Körpers; die Glasteilchen an der Oberfläche des Glases ziehen die in ihrer Nähe befindlichen Wasserteilchen stärker an, als die Wasserteilchen sich selbst anziehen; deshalb bleibt eine Schichte Wasser an dem Glase hängen und die Schwerkraft allein ist nicht im stande, sie loszureißen. Hierauf beruht das Leimen, Kleistern, Kitten, Löten, Schweißen, Mörteln u. s. w. Denn beim Leimen bestreicht man die beiden Hölzer an den Stellen, mit welchen sie zusammengeleimt werden sollen, mit flüssig gemachtem Leim; dessen Teilchen adhärieren leicht am Holze und zwar, weil sie flüssig sind, an der ganzen Fläche. Man drückt nun die Hölzer aneinander und läßt den Leim austrocknen; dadurch wird der Leim ein fester Körper und hart, seine Teilchen adhärieren immer noch an den Holzteilchen und vereinigen durch ihre Kohäsionskraft die beiden Holzstücke. Man bringt also stets zwischen die zwei festen Körper, die vereinigt werden sollen, einen flüssigen, der an beiden gut adhäriert, und läßt den flüssigen Körper dann fest werden.

23. Gleichmäßige Fortpflanzung des Druckes, hydraulische Presse.

Eine weitere wichtige Eigenschaft flüssiger Körper ist die gleichmäßige Fortpflanzung des Druckes.

Wenn man auf einen festen Körper einen Druck ausübt, so pflanzt sich der Druck in der Richtung fort, in welcher er ausgeübt wird: im flüssigen Körper pflanzt sich der Druck gleichmäßig nach allen Seiten fort. Man sieht dies an folgendem Versuche. Man nimmt ein starkwandiges Gefäß, das ganz verschlossen und voll Wasser ist. An den Wänden, auch am Boden und im Deckel sind Röhren angesetzt, in diesen dicht anschließende Kolben angebracht und an diesen sind Stangen befestigt, durch welche man auf die Kolben, also auch auf Wasser einen Druck ausüben kann.

Drückt man den oberen Kolben nach abwärts, so geht der am Boden befindliche Kolben nach abwärts, der Druck hat sich im Wasser nach abwärts fortgepflanzt; aber auch ein an der Seitenwand angebrachter Kolben wird dadurch bewegt und geht nach auswärts, und ein zweiter, am Deckel angebrachter Kolben geht sogar nach aufwärts. Man schließt also: **ein auf die Flüssigkeit ausgeübter Druck pflanzt sich in ihr nach allen Richtungen fort.**

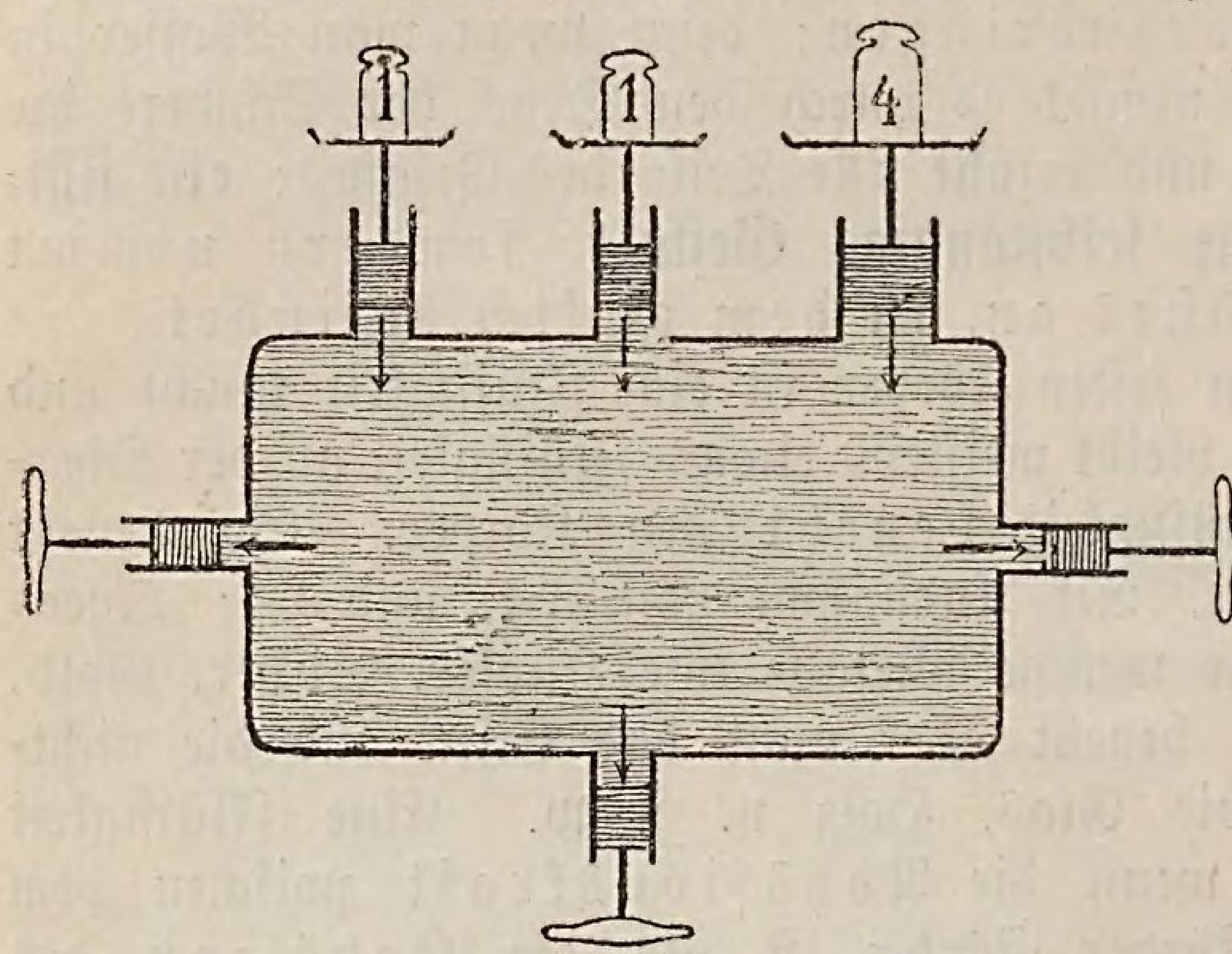


Fig. 25.

Kann man die Kolben mit Gewichten belasten und dadurch einen Druck auf die Flüssigkeit ausüben, so findet man folgendes: Sind die Röhren gleich weit, also die Flächen der Kolben gleich groß, und ich lege auf den einen 1 *kg*, so wird der andere mit der Kraft von 1 *kg* nach aufwärts gedrückt; denn man muß den andern auch genau mit 1 *kg* belasten, damit er in Ruhe bleibt. Habe ich aber noch einen dritten Kolben, dessen Fläche größer, etwa viermal größer ist als die des ersteren, und ich lege auf den ersten wieder 1 *kg*, so wird dieser dritte jetzt mit der Kraft von 4 *kg* nach aufwärts gedrückt; denn man findet, daß man jetzt 4 *kg* auf ihn legen muß, damit er sich nicht bewegt. Man schließt: **ein auf die Flüssigkeit ausgeübter Druck pflanzt sich in ihr auch mit gleicher Stärke auf gleiche Flächen, also mit *n* facher Stärke auf eine *n* mal größere Fläche fort.** Es findet sich hiebei die goldene Regel bestätigt. Denn wenn der erste Kolben durch die Kraft von 1 *kg* etwa 1 *dm* herabgedrückt wird, so wird der zweite Kolben, welcher eine sechsmal größere Fläche hat, nicht 1 *dm* hoch gehoben, sondern blos $^1/_6$ *dm*; sein Weg ist sechsmal kleiner, dafür ist aber auch die Kraft, die auf ihn wirkt, sechsmal größer, nämlich 6 *kg*.

Dies Gesetz von der gleichmäßigen Fortpflanzung des Druckes ist das Grundgesetz der flüssigen Körper; es lassen sich aus ihm alle anderen Gesetze der flüssigen Körper ableiten. Es wurde entdeckt von Pascal 1648; er machte dabei auch darauf aufmerksam, daß die Kräfte sich umgekehrt verhalten wie die Wege der Kolben, gerade so wie bei Hebel, Rolle u. s. w.

Aus diesem Gesetze erklärt sich, warum eine Weinflasche zerspringt, wenn der Stopfen unmittelbar auf dem Weine sitzt und nun durch leichte Schläge weiter hineingetrieben wird; denn der durch

den Schlag auf den Stopfen ausgeübte Druck pflanzt sich im Wein nach allen Seiten fort, und jedes Flächenstück der Flasche, das so groß ist, als der Querschnitt des Stopfens, wird ebensostark gedrückt; dies gibt zusammen einen sehr großen Druck, welcher die Flasche zersprengt. Wenn Kanonenkugeln ins Wasser fliegen und darin explodieren (krepieren), so pflanzt sich der Druck weithin fort und tötet die Fische in großem Umkreise.

Auf diesem Gesetze beruht auch die hydraulische Presse (auch hydrostatische oder Bramah-Presse genannt), welche folgendermaßen eingerichtet ist: In einem Druckcylinder, einer engen Röhre, befindet sich ein dicht anschließender Kolben, der mit der Hand oder mittels eines Druckhebels niedergedrückt werden kann, Vom Druckcylinder führt unten eine Röhre herüber zum Preßcylinder; das ist eine weite, dickwandige und deshalb sehr starke Röhre; in ihr befindet sich auch ein dicht anschließender Kolben, der Preßkolben, auf den oben die Preßplatte aufgesetzt ist. Die beiden Cylinder sind mit Wasser oder Öl gefüllt.

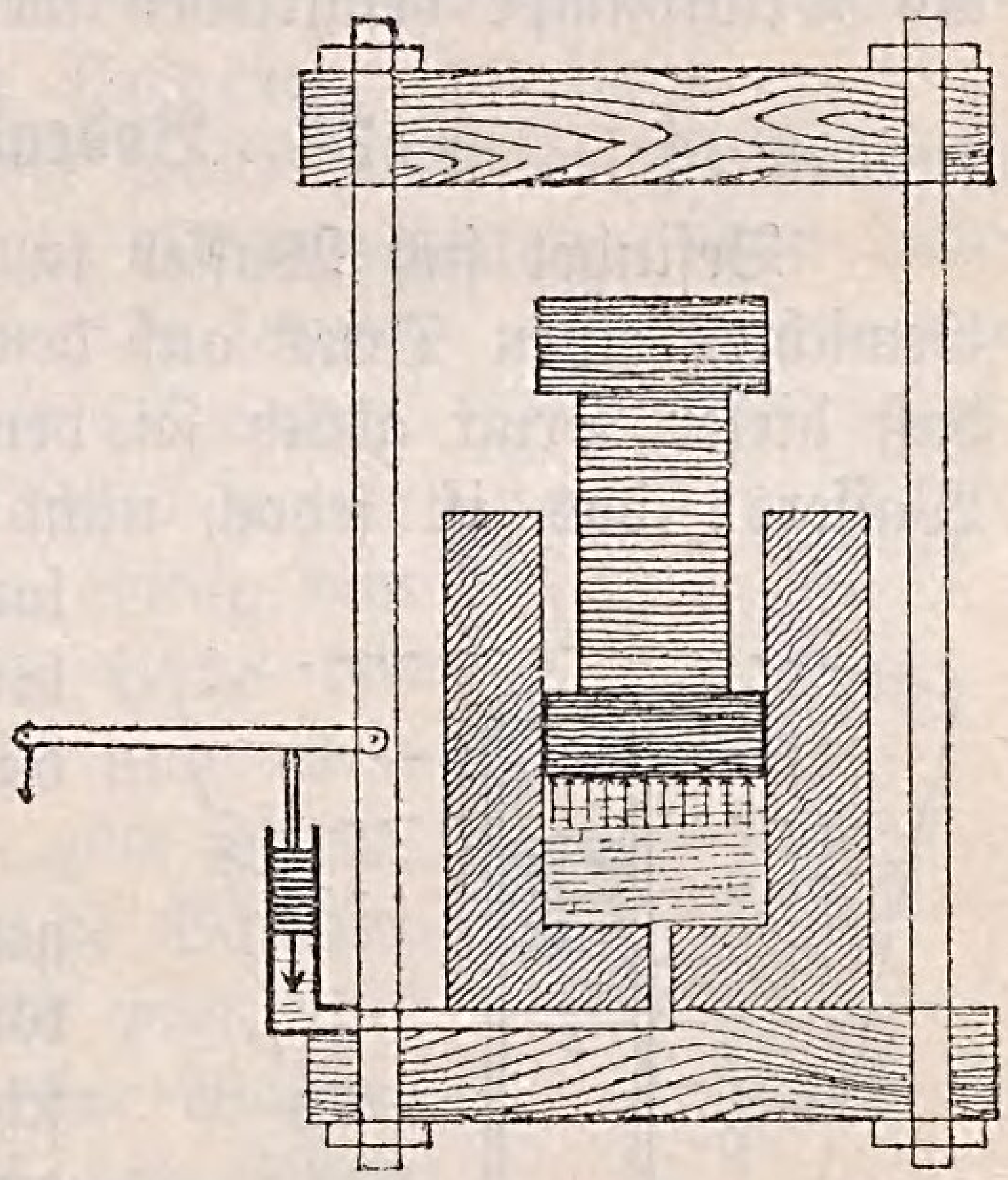


Fig. 26.

Ein auf den Druckkolben ausgeübter Druck pflanzt sich im Wasser gleichmäßig fort, und drückt deshalb den Preßkolben mit einer sovielmal größeren Kraft in die Höhe, als die Fläche des Preßkolbens größer ist als die Fläche des Druckkolbens. Ist diese etwa 400 mal größer (wobei der Durchmesser des Preßkolbens 20 mal größer sein muß als der des Druckkolbens), und drücke ich mit einer Kraft von 50 *kg* auf das Ende eines Druckhebels, dessen kurzer Hebelarm etwa 6 mal kürzer ist, so ist der Druck auf den Druckkolben $= 6 \cdot 50 =$ 300 *kg*; dieser Druck pflanzt sich im Wasser fort und bewirkt im Preßcylinder einen 400 mal stärkeren Druck, also $300 \cdot 400 = 120\,000$ *kg* $= 2100$ Ztr. Mit einer so ungemein großen Kraft wird also der Preßcylinder in die Höhe gedrückt.

Man verwendet diese Presse entweder zum Heben von sehr schweren Lasten oder zum Pressen. In letzterem Falle ist etwas oberhalb der Preßplatte eine starke Platte angebracht, die durch starke eiserne Stangen mit der Grundplatte verbunden ist. Zwischen die Preßplatte und dieses obere Widerlager wird der Gegenstand gelegt, der gepreßt werden soll. Man benützt solche Pressen zum Pressen von Papier oder Leder, zum Zusammenpressen der Baumwolle, um sie besser verpacken zu können, zum Biegen starker Eisen-

und Stahlstangen, um ihre Festigkeit zu prüfen oder ihnen eine gewünschte Form zu geben (Biegen der Panzerplatten der Kriegsschiffe), zum Pressen von Thonwaren, um sie dichter zu machen und ihnen größere Festigkeit zu geben u. s. w. Baumwolle oder Papiermasse, sehr stark gepreßt, wird hart wie Stahl, ist nicht mehr porös, sondern dicht wie Elfenbein, so daß man daraus Schienen und Radkränze macht, die man an Stelle der eisernen bei Eisenbahnen anzuwenden versucht. Hydraulische Pressen vergrößern den Druck mehr als jede andere Sorte von Pressen, so daß sie zur Hervorbringung des stärksten Druckes und zum Heben der schwersten Lasten gebraucht werden. Am Druckcylinder ist eine Vorrichtung angebracht, mittels deren man den Druckkolben oftmals nach einander herabdrücken und so den Preßcylinder immer höher heben kann; dieselbe wird später als Druckpumpe beschrieben werden.

24. Bodendruck des Wassers.

Befindet sich Wasser in einem Gefäße, so übt es wegen seines Gewichtes einen Druck auf den Boden aus. Man möchte glauben, daß dieser Druck gleich sei dem Gewichte des im Gefäß enthaltenen Wassers; das ist jedoch nicht der Fall, und da das Gesetz anders lautet, als man von vorne herein glauben möchte, so nennt man es das hydrostatische Paradoxon.

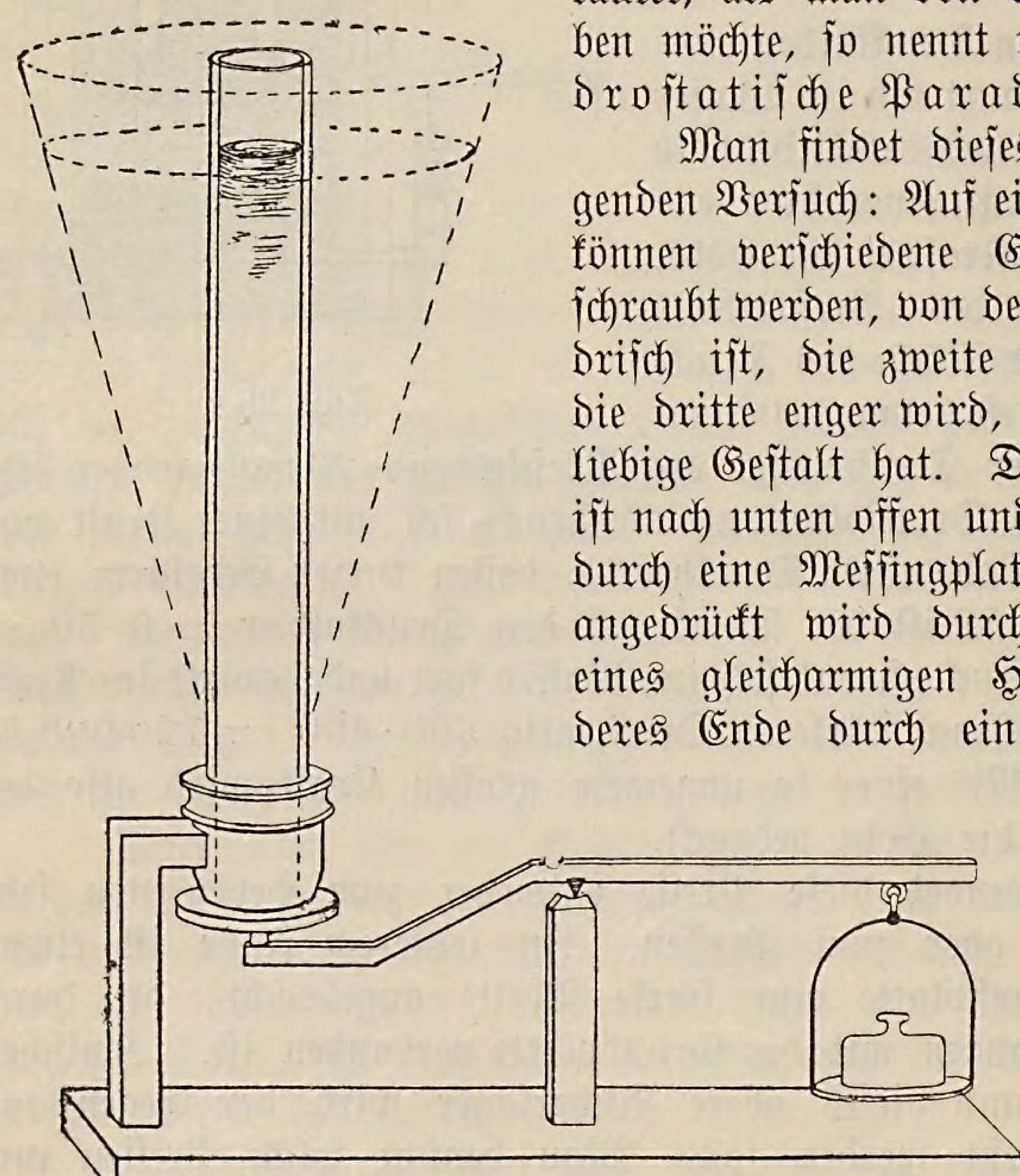


Fig. 27.

Man findet dieses Gesetz durch folgenden Versuch: Auf eine Messingfassung können verschiedene Glasröhren aufgeschraubt werden, von denen die eine cylindrisch ist, die zweite nach oben weiter, die dritte enger wird, die vierte eine beliebige Gestalt hat. Die Messingfassung ist nach unten offen und wird verschlossen durch eine Messingplatte, welche an sie angedrückt wird durch das eine Ende eines gleicharmigen Hebels, dessen anderes Ende durch ein gewisses Gewicht belastet wird. Diese Platte stellt den Boden des Gefäßes dar, das durch die aufgeschraubten Glasröhren gebildet wird. Gießt man nun

Wasser in die Röhren, so drückt es auf die Platte und wird sie herabdrücken, wenn der Druck des Wassers gleich ist dem Drucke, mit welchem der Hebel die Platte nach aufwärts drückt. Man gießt nun vorsichtig so viel Wasser in die Röhre, bis der Druck des Wassers gleich ist dem Drucke des Hebels. Wenn man diesen Versuch nach einander mit den vier Glasröhren macht, so findet man, daß man das Wasser in allen bis zu derselben Höhe einfüllen muß, damit sein Druck dem Drucke des Hebels gleich ist. Man sieht, daß die Menge, also auch das Gewicht des Wassers in den 4 Röhren sehr verschieden ist, und daß doch der Druck auf den Boden in allen derselbe ist. Man schließt also: der Bodendruck des Wassers ist nicht abhängig von der Form oder Größe des Gefäßes, sondern nur abhängig von der Größe des Bodens und von der Höhe des Wasserspiegels über dem Boden.

Dieser Satz läßt sich aus dem Satze über die gleichmäßige Fortpflanzung des Druckes auf folgende Weise ableiten. Man denke sich das im Gefäße befindliche Wasser in lauter horizontale Schichten zerschnitten, deren Höhe recht klein sei, etwa 1 *cm*, so daß die Flächen zweier aufeinanderfolgenden Schichten nur um wenig von einander verschieden sind. Ist die Höhe des Wassers im Gefäße etwa h *cm*, so sind es h solche Schichten. Der Boden habe q *qcm* Fläche. Ich betrachte nun eine beliebige solche Schichte, sie habe eine Grundfläche von etwa 240 *qcm*, ihre Höhe 1 *cm*, also ihr Inhalt 240 *ccm* Wasser; diese wiegen 240 *g* und drücken auf eine Fläche von 240 *qcm*, also trifft auf 1 *qcm* ein Druck von 1 *g*.

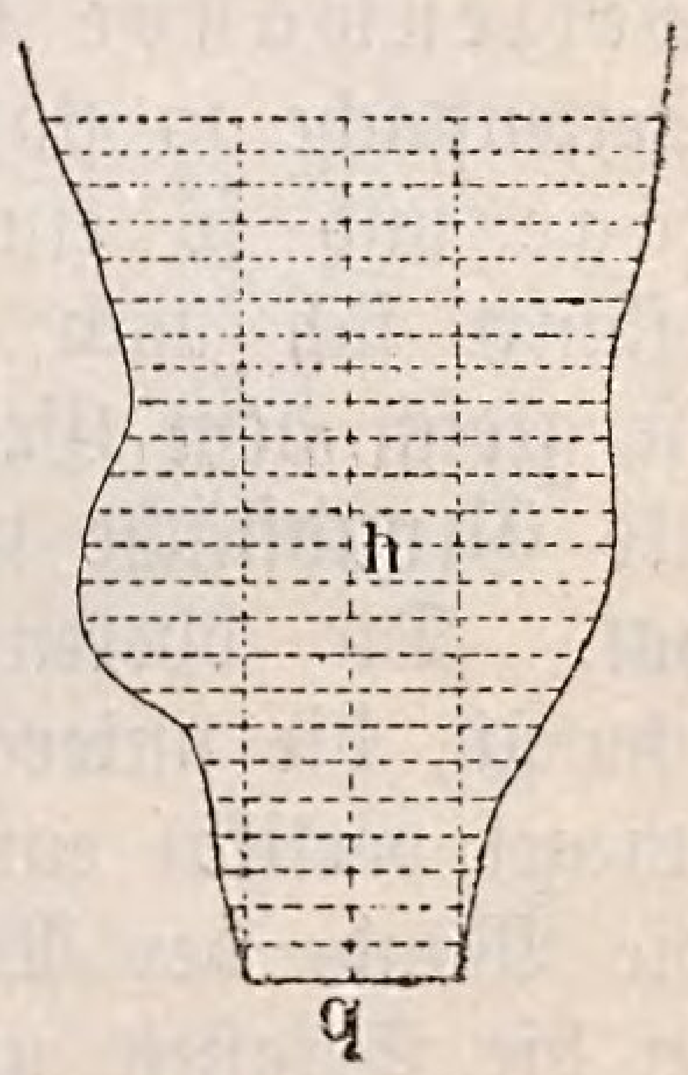


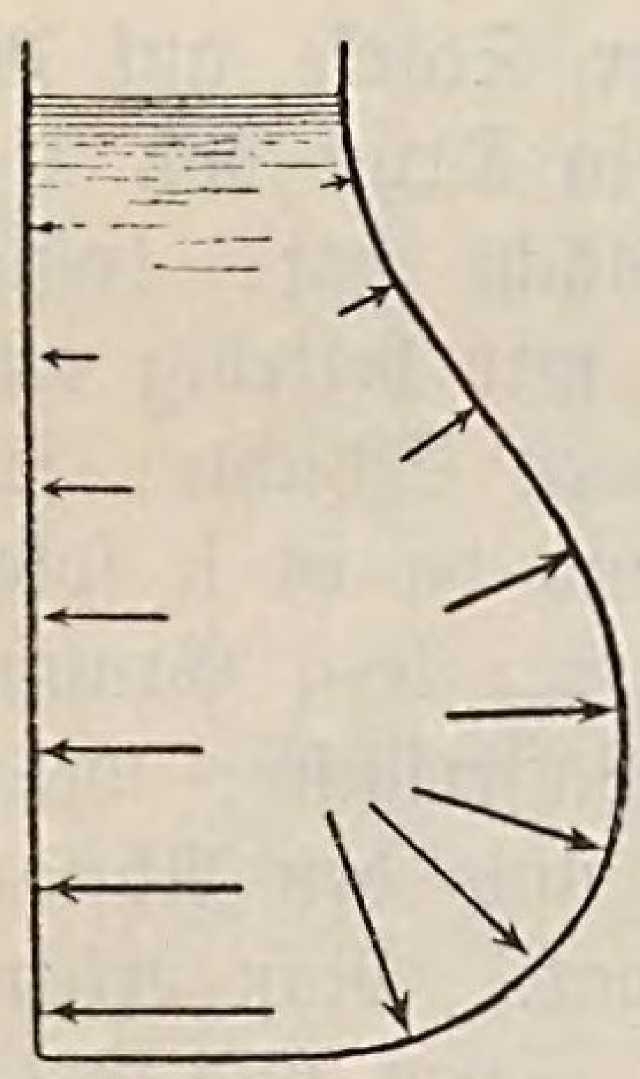
Fig. 28.

Dieser Druck pflanzt sich mit gleicher Stärke auf den Boden fort, also trifft dort auf jedes *qcm* auch ein Druck von 1 *g*, also auf den ganzen Boden, der ja q *qcm* Fläche hat, treffen q *g* Druck, herrührend von dem Drucke der von mir beliebig ausgewählten Schichte. Dasselbe gilt von jeder andern Schichte; jede drückt mit der Kraft von q *g* auf den Boden, und da es h solche Schichten sind, so ist der Druck aller Schichten $= h \cdot q$ Gramm. Aber $h \cdot q$ Gramm ist auch das Gewicht einer Wassersäule, welche den gedrückten Boden als Grundfläche (q *qcm*) und den Abstand des Bodens vom Wasserspiegel (h *cm*) zur Höhe hat. Man erkennt also wieder, daß dieser Bodendruck nicht von der Form und Größe des Gefäßes, sondern bloß von der Größe des Bodens, q *qcm*, und der Höhe des Wassers, h *cm*, abhängt, und: **der Bodendruck ist so groß wie das Gewicht einer Wassersäule, welche vom Boden aus senkrecht in die Höhe geht bis zum Wasserspiegel** $= q \cdot h$. Dieser wichtige Satz heißt nach seinem Erfinder der Paskal'sche.

Der Bodendruck ist demnach leicht zu berechnen. Bei einer Tiefe von 10 *m* beträgt der Bodendruck auf jedes *qcm* 1 *kg*, was man sich merken mag. Bei beträchtlichen Tiefen wird dieser Druck sehr groß, in einer Meerestiefe von 1000 *m* beträgt er 100 *kg* auf jedes *qcm* (sogar noch etwas mehr, weil das Meerwasser etwas schwerer ist als das reine Wasser). Wenn man eine mit Bleikugeln beschwerte und fest verschlossene Flasche in solche Tiefe hinabsinken läßt, so wird sie durch den Druck des Wassers zerdrückt. Ein Mensch kann nicht sonderlich tief unter Wasser tauchen; denn durch den Druck des Wassers wird das Blut aus Armen und Füßen ins Herz zurückgepreßt und der Brustkorb stark zusammengedrückt, was innere Verletzungen zur Folge hat; ohne weitere Vorrichtungen kann man nicht tiefer als 20 *m* unter das Wasser tauchen; Perl- und Schwammfischer tauchen bis höchstens 25 *m*.

25. Seitendruck des Wassers. Wasserräder.

Wie auf den Boden, so drückt das Wasser auch auf die Seitenwände des Gefäßes und zwar wird jedes Stücklein einer Seitenfläche so stark gedrückt, wie wenn dies Stücklein horizontal läge und so ein Teil einer Bodenfläche wäre; denn der Druck pflanzt sich nach allen Seiten gleichmäßig fort. **Der Seitendruck ist gleich dem Gewichte einer Wassersäule, die das Seitenstücklein als Grundfläche und seinen Abstand vom Wasserspiegel als Höhe hat.** Die oberen Teile einer Seitenwand werden demnach nur schwach, die unteren um so stärker gedrückt, je weiter sie vom Wasserspiegel vertikal entfernt sind. Bei einer Wasserleitung erleiden die Wände der Röhren, die vom großen Reservoir (Hochreservoir) in die Straßen und Häuser führen, einen bedeutenden Druck, bei etwa 50 *m* Höhe 5 *kg* auf jedes *qcm*; die Röhren müssen deshalb aus dickem Eisen gemacht werden. Die Richtung dieses Seitendruckes ist bei jedem Flächenteil senkrecht auf die Fläche nach auswärts gerichtet.


Fig. 29.

Der Seitendruck wird vielfach angewandt, um Maschinen zu treiben. Wenn Wasser in einem gewöhnlichen Gefäße sich befindet, so bringt der Seitendruck keine Bewegung hervor; denn der Seitendruck auf die rechts liegenden Teile der Wände wird aufgehoben durch den ebensogroßen Druck auf die links liegenden. Wenn man aber etwa rechts ein Loch in die Wand macht, so kann das Wasser auf diesen Flächenteil nicht mehr drücken, weil er nicht mehr da ist; aber auf den gegenüberliegenden Flächenteil drückt das Wasser noch, und drückt ihn demnach nach links. Man sieht dies, wenn man ein Gefäß an einer Schnur aufhängt, voll Wasser gießt

und rechts ein Loch anbringt; das Gefäß wird etwas nach links verschoben, während das Wasser nach rechts herausfließt. (Fig. 30.)

Hierauf beruht das Segner'sche Wasserrad (1750). Es besteht aus einer hohen, leicht drehbar aufgestellten Röhre, in welche oben das Wasser hineingeleitet wird, so daß sie beständig voll ist. Unten gehen mehrere Arme heraus, die nicht nach auswärts sondern nach seitwärts Öffnungen haben, aus denen das Wasser herausfließt. Die Öffnungen sind alle nach derselben Seite hin gerichtet. Das Wasser drückt auf die diesen Öffnungen gegenüberliegenden Teile der Röhren und dieser Seitendruck dreht das Rad herum, entgegengesetzt der Richtung des ausfließenden Wassers. Durch dieses Rad kann dann eine Mühle oder irgend eine Arbeitsmaschine getrieben werden. Man verwendet sie mit Vorteil in gebirgigen Gegenden. Diese Maschinen nützen die vorhandene Wasserkraft gut aus. Berechnet man nämlich die Arbeitskraft des hineingeleiteten Wassers, — z. B. es fließen in jeder Sekunde 90 *l* in der 6 *m* hohen Röhre herunter, so ist diese Arbeitskraft des Wassers $= 90 \cdot 6 = 540$ *kgm* pro Sekunde — und mißt man nun auch die Arbeit, die durch dasselbe verrichtet wird, so findet man bei gut eingerichteten Maschinen, daß diese bis 75% der Arbeit des Wassers beträgt, daß also bloß 25% verloren gehen.

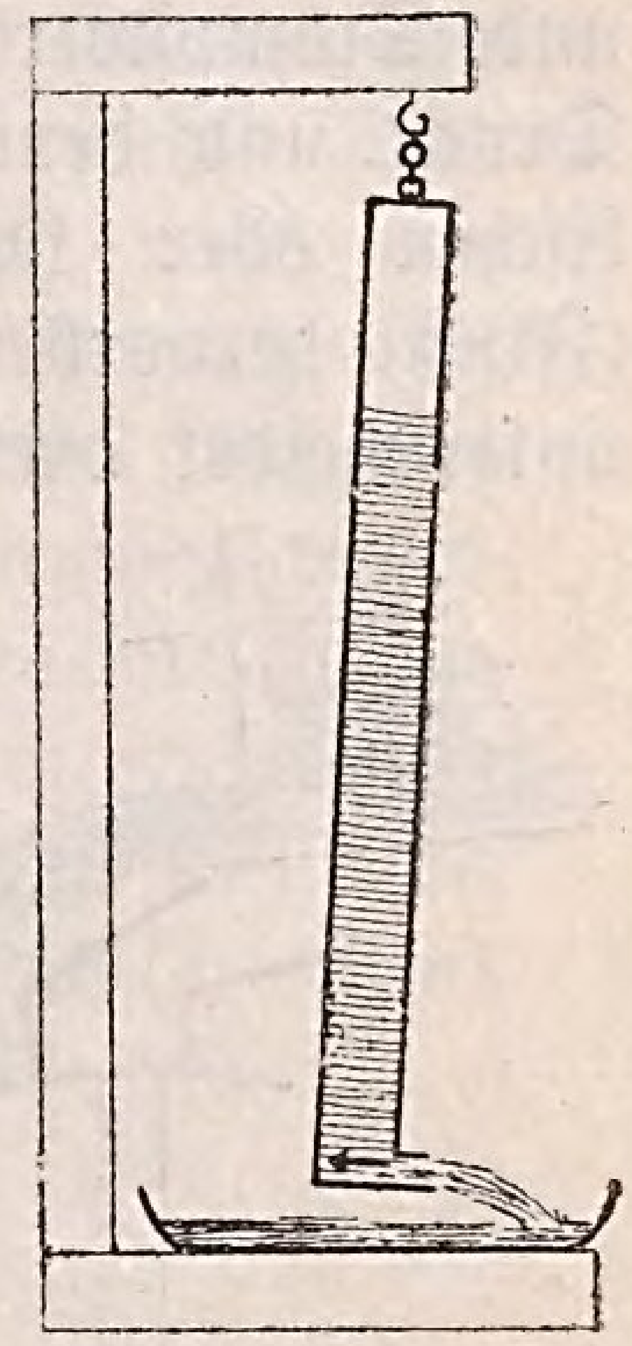


Fig. 30.

Die Segner'schen Wasserräder sind jetzt ersetzt durch die Turbinen, welche bei ähnlicher Einrichtung nach demselben Gesetz bewegt werden.

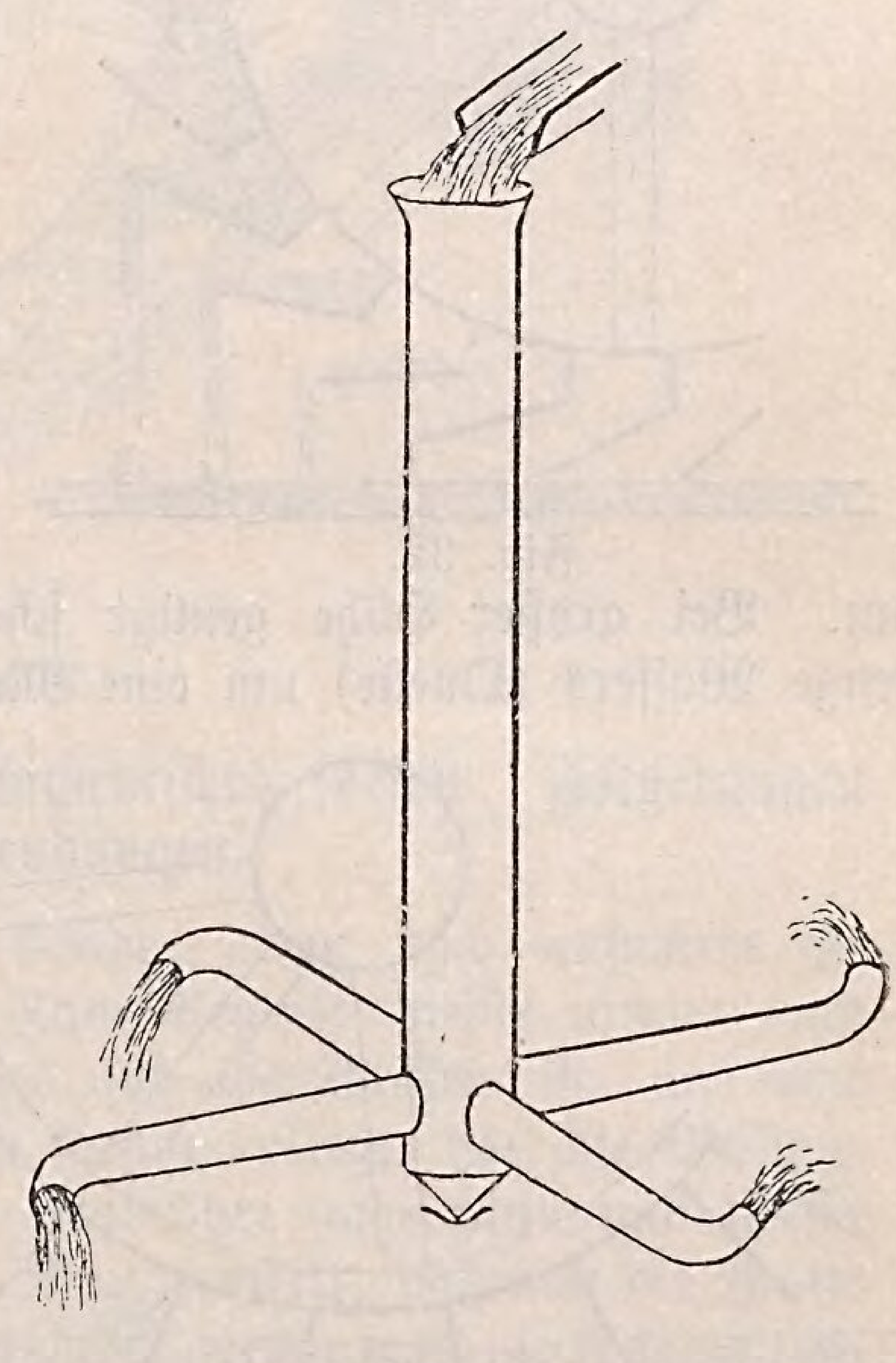


Fig. 31.

Die Sätze vom Boden- und Seitendruck gelten von jeder Flüssigkeit, und lauten allgemein: der Bodendruck einer Flüssigkeit ist gleich dem Gewichte einer Flüssigkeitssäule, die den Boden als Grundfläche und seinen Abstand vom Niveau als Höhe hat.

Die Wasserräder.

Die anderen Wasserräder, durch welche man die Kraft des Wassers benützt, um Arbeitsmaschinen (Mühlen, Sägen, Hammer- und Stampfwerke u. s. w.) zu bewegen, beruhen einerseits auf dem Drucke und dem Gewichte des Wassers, anderseits auf dem hydraulischen oder hydrodynamischen Drucke, welchen bewegtes Wasser (Fluß) hervorbringt, wenn es auf einen festen Körper trifft. Man unterscheidet drei Arten von Wasserrädern:

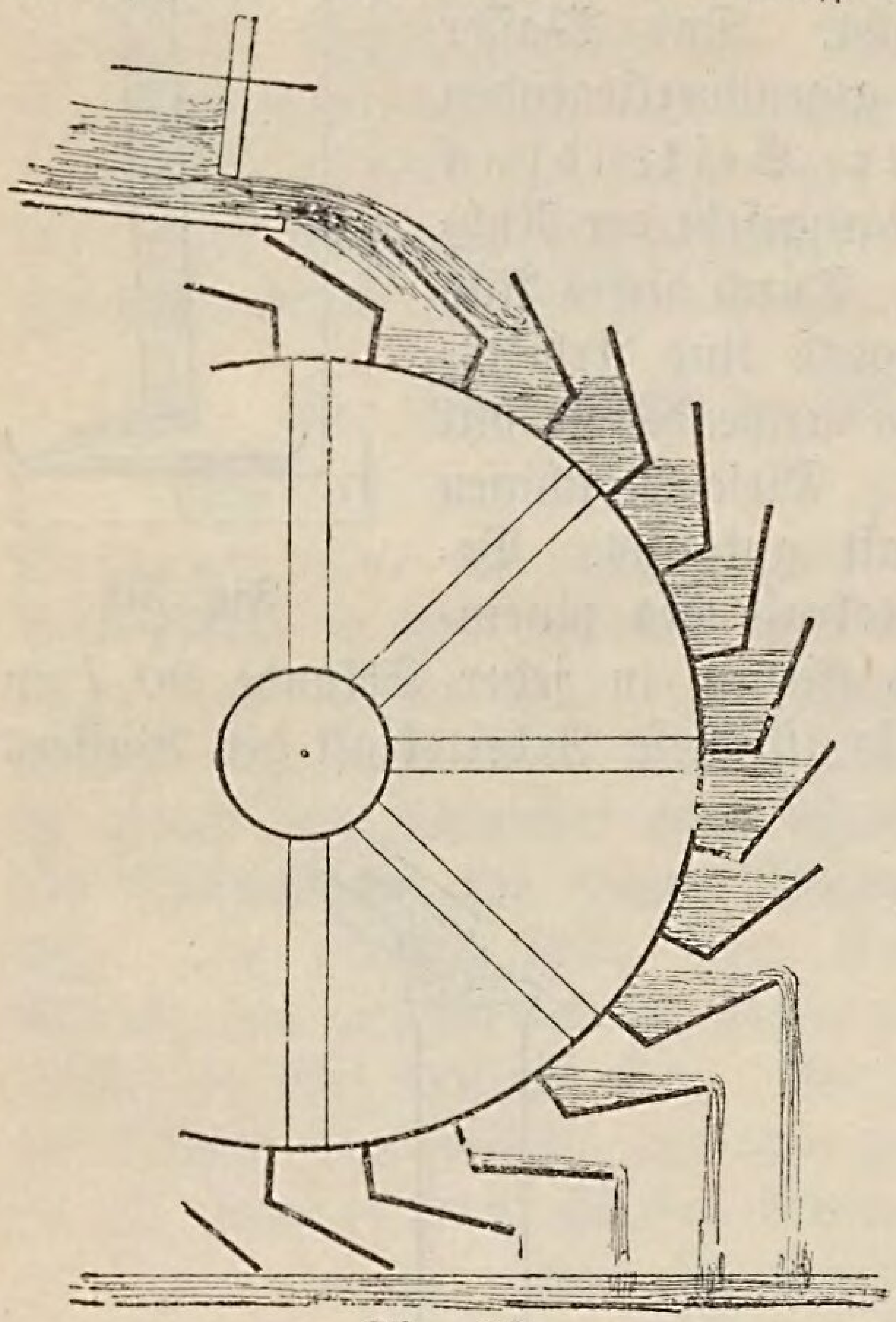


Fig. 32.

a) das oberschlächtige Wasserrad. (Fig. 32.) Es hat außen am Radkranze viele kasten- oder zellenförmige Schaufeln, deren Öffnungen alle nach derselben Seite hin gerichtet sind. Das Wasser wird von oben her in die Zellen geleitet, füllt sie an und fließt, wenn die Zellen unten ankommen, wieder aus. Weil sich stets nur auf der einen Hälfte des Rades Wasser in den Zellen befindet, so bringt es das Rad in Drehung durch sein Gewicht. Es wird nur in gebirgigem Lande angewandt, wo durch Kanalisierung eines Baches oder Anlage einer Rinne das Wasser leicht in der erforderlichen Höhe (2 bis 8 *m*) erhalten werden kann. Bei großer Höhe genügt schon eine scheinbar geringfügige Menge Wassers (Quelle) um eine Mühle zu treiben.

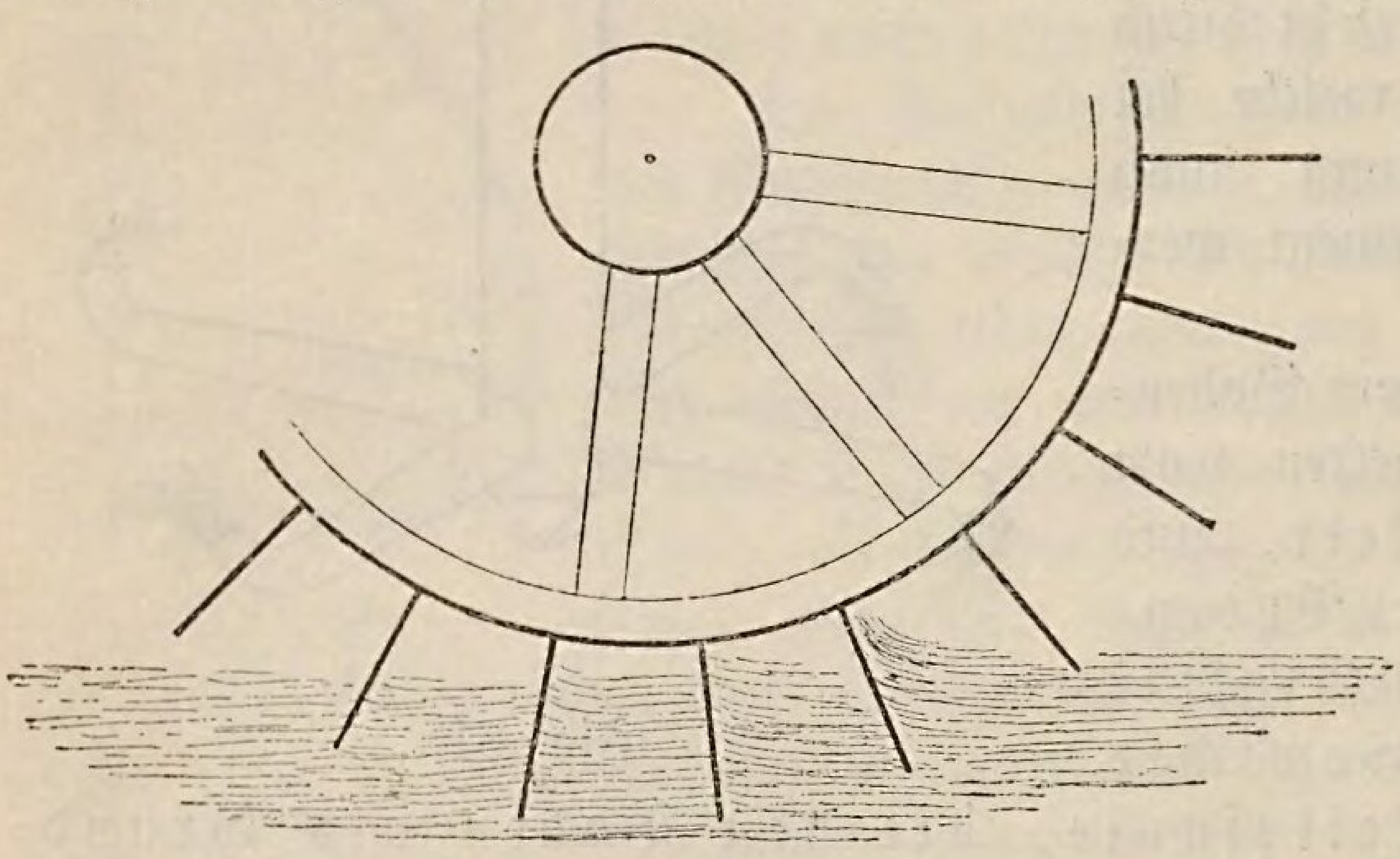


Fig. 33.

b) Das unterschlächtige Wasserrad. (Fig. 33.) Es hat außen am Radkranz breite Schaufeln, mit denen es in fließendes Wasser (Fluß) eintaucht. Der Stoß des fließenden Wassers setzt es in

Bewegung. Es wird im ebenen Terrain angewendet bei Flüssen, die nicht gestaut werden können (Schiffmühlen). Durch Vergrößerung der Schaufeln erhält man auch bei schwach fließendem Wasser hinreichende Kraft.

c) Das mittelschlächtige Rad. (Fig. 34.) Es hat am Radkranze Schaufeln, die mit Vorteil schwach gebogen sind. Das Wasser wird etwas, 1 bis 2 *m*, gestaut, schießt dann unter der Schleuse hervor in eine Rinne, welche genau den Radkranz umschließt, übt vermöge seiner Geschwindigkeit einen Druck auf die Schaufeln, auf welche es stößt, und übt dann noch vermöge seines Gewichtes einen Druck auf die Schaufeln, bis es unten die Rinne verläßt; es kann als eine Verbindung des ober- und unterschlächtigen Rades angesehen werden und wird da angewandt, wo man Bäche oder Abzweigungen von Flüssen nicht besonders hoch (1—2 *m*) stauen kann.

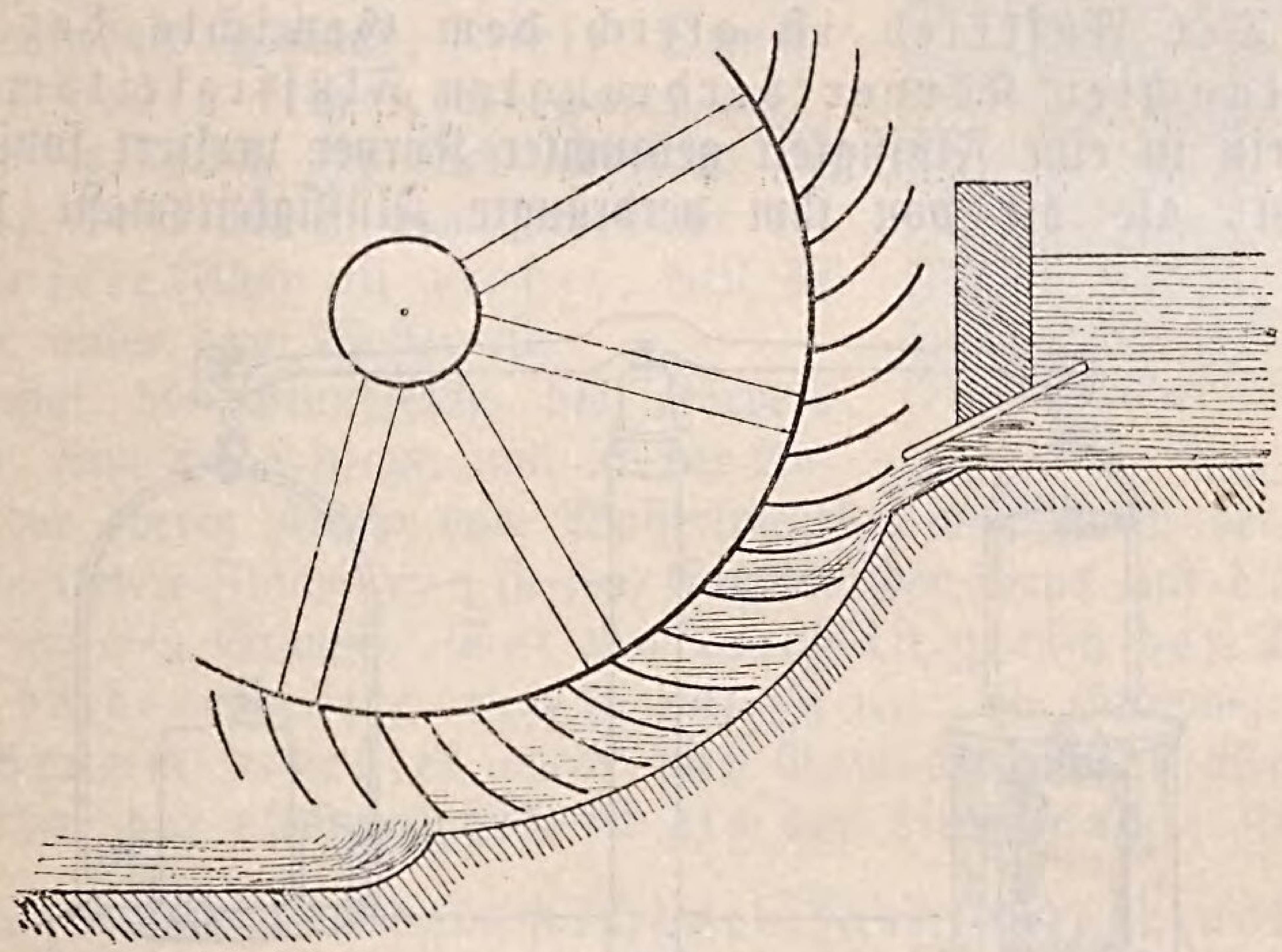


Fig. 34.

26. Auftrieb des Wassers, Archimedisches Gesetz. Folgerungen und Anwendungen.

Das Wasser ist sogar im stande, einen nach aufwärts gerichteten Druck hervorzubringen. Zum Beweise hiefür nimmt man eine Glasröhre, deren unterer Rand gut abgeschliffen ist, und eine Messingplatte, die genau an diesem Rande anliegt, hält die Messingplatte durch eine Schnur an die Glasröhre angedrückt und taucht beides so ins Wasser. (Fig. 35.) Man bemerkt, daß nun die Platte nicht mehr von der Röhre wegfällt, auch wenn man die Schnur losläßt, und schließt also, daß sie durch den Druck des Wassers nach aufwärts gepreßt wird. Dieser Druck, den man Auftrieb nennt, folgt auch den Gesetzen über den Bodendruck.

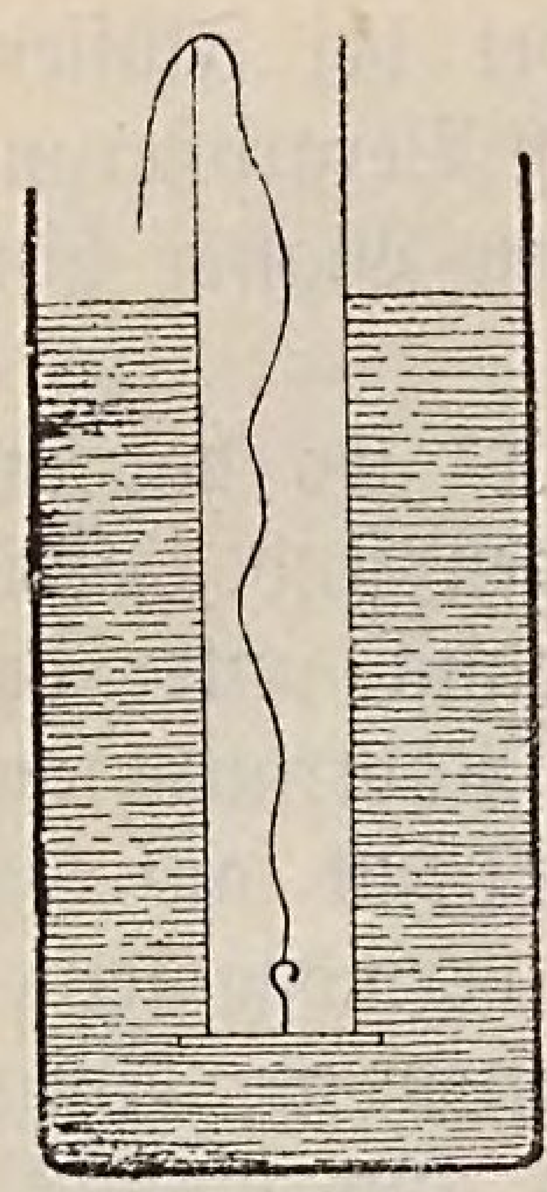


Fig. 35.

Wenn ein Körper ganz in Wasser getaucht ist, so wird er durch den Druck des Wassers nach aufwärts getrieben; dieser Druck wirkt dem Gewichte des Körpers entgegen, verringert also das Gewicht des Körpers und wird Auftrieb genannt. Bindet man einen Körper an eine Wagschale und wägt ihn so, und dann nochmals, während man ihn in Wasser hängen läßt, so findet man, daß er nun leichter ist. Die Größe dieses Auftriebes ergibt sich aus folgendem Gesetze, das von Archimedes gefunden wurde und nach ihm das **Archimedische Gesetz oder Prinzip** genannt wird. Der Auftrieb ist so groß wie das Gewicht einer Flüssigkeitsmasse, die ebensogroß ist, wie der eingetauchte Körper, oder: Der Auftrieb ist gleich dem Gewichte der vom eingetauchten Körper verdrängten Flüssigkeitsmasse; oder: **ein in eine Flüssigkeit getauchter Körper verliert soviel an Gewicht, als die von ihm verdrängte Flüssigkeitsmasse wiegt.**

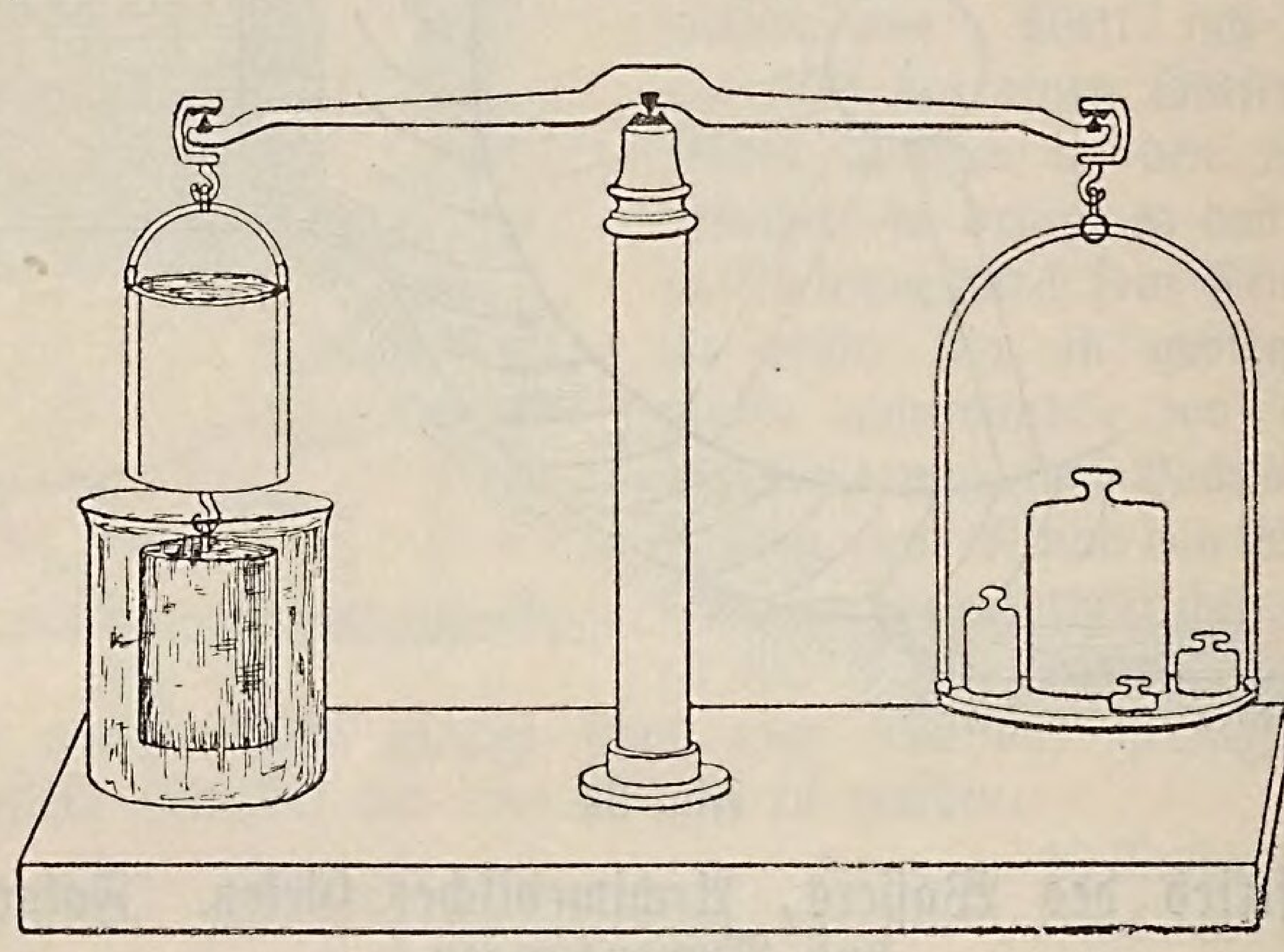


Fig. 36.

Man erkennt das Gesetz durch folgenden Versuch. Man hat ein cylindrisches Messingeimerchen, das sehr genau ausgedreht ist; in dasselbe paßt genau ein Messingcylinder, der mittels eines Hakens unten an das Eimerchen angehängt werden kann. Man hängt nun das Eimerchen, an welchem unten der Cylinder hängt, an den einen Wagbalken und legt auf die andere Wagschale ein Gegengewicht, bis die Wage horizontal steht. Man stellt nun unter den Messingcylinder ein Glas Wasser, so daß der Cylinder eintaucht; er geht dann in die Höhe, getrieben durch den Auftrieb des Wassers.

Um das Gleichgewicht wieder herzustellen, gießt man nun in das Eimerchen so viel Wasser, bis die Wage wieder im Gleichgewichte steht, und findet, daß man gerade soviel eingießen muß, bis es ganz voll ist; man sieht, daß der Auftrieb, den der Messingcylinder erleidet, aufgehoben wird durch das Gewicht eines gleich großen Volumens Wasser, und schließt hieraus das Archimedische Gesetz.

Man kann das Gesetz auch aus den Sätzen über den Bodendruck ableiten und zwar leicht bei einfach geformten Körpern. Wenn nämlich der eingetauchte Körper rechteckig begrenzt ist, also etwa die Form eines Ziegelsteines hat, so werden alle seine Flächen vom Wasser gedrückt. Die Druckkräfte auf die Seitenflächen heben sich auf, weil sie gleich groß und entgegengesetzt gerichtet sind. Seine obere Fläche wird nach abwärts, die untere nach aufwärts gedrückt; diese Druckkräfte heben sich nicht ganz auf, sondern es bleibt ein nach aufwärts gerichteter Druck übrig; denn der Druck auf die untere Fläche ist größer, weil sie tiefer unter dem Wasser ist.

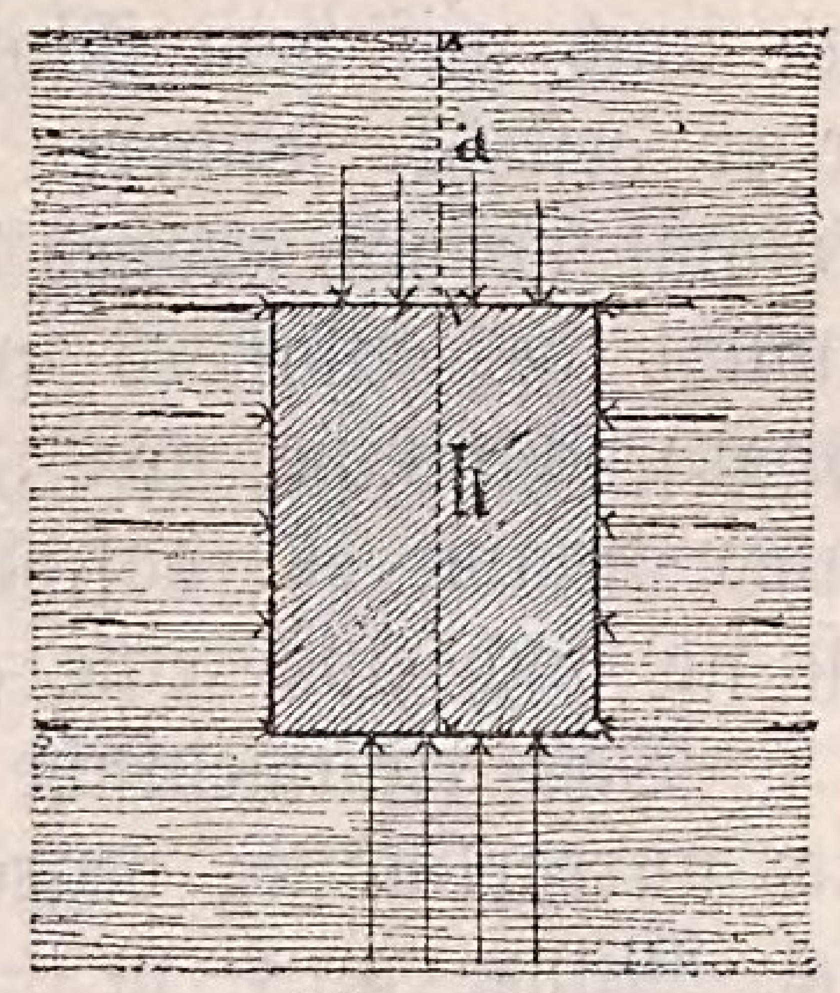


Fig. 37.

Hat die Grundfläche des Körpers q *qcm*, seine Höhe h *cm*, und ist der Abstand der oberen Fläche vom Wasserspiegel a *cm*, so ist der Druck auf die untere Fläche $= q\,(h+a)$ Gramm, der Druck auf die obere Fläche $= q \cdot a$ Gramm. Der Auftrieb ist gleich der Differenz beider Kräfte $= q\,(h+a) - q \cdot a = qh$ Gramm; aber $q \cdot h$ Gramm bedeutet auch das Gewicht eines Wasserkörpers, der ebensogroß ist als der eingetauchte Körper.

Folgerungen aus dem Archimedischen Gesetze und Anwendungen desselben.

Jeder im Wasser befindliche Körper verliert an Gewicht, und zwar für jedes *cdm* verliert er 1 *kg*; der Gewichtsverlust ist bloß vom Volumen, nicht vom Gewichte des eingetauchten Körpers abhängig. Die im Wasser liegenden Steine sind nahezu um die Hälfte leichter als in der Luft; ein Stein, der in der Luft 2 Ztr. wiegt, wiegt im Wasser nur 1 Ztr. und einige Pfund; daraus erklärt sich auch, daß die Flüsse eine große Masse von Steinen als Gerölle, Geschiebe, Kies und Sand mit sich führen und leicht immer weiter fortschieben können. Da Eisen bei gleichem Gewichte ein kleineres Volumen hat als Stein, so verliert es im Wasser weniger an Gewicht, es verliert etwa ein Siebentel; ein Zentner Eisen wiegt also im Wasser noch ca 86 ℔; Blei verliert noch weniger, Gold noch weniger, weil es bei gleichem Gewichte noch weniger Volumen hat.

Gold sinkt also leichter zu Boden und wird vom Wasser weniger leicht fortgeschwemmt als Sand (Goldwäsche).

Wenn das Gewicht eines Körpers kleiner ist als das Gewicht eines gleich großen Volumens Wassers, also der Auftrieb größer ist als das Gewicht des Körpers, so wird der Körper vom Wasser nach aufwärts getrieben und schwimmt dann auf dem Wasser. Ein Teil des Körpers ist dann über dem Wasser, der andere Teil unter dem Wasser und bloß der letztere gibt Anlaß zum Auftrieb. **Der schwimmende Körper taucht so tief ein, bis das Gewicht des von ihm verdrängten Wassers so groß ist als sein eigenes Gewicht.** Wenn ein Körper auf dem Wasser schwimmt, so sagt man, er ist leichter als Wasser. Ein hohler Körper kann auch auf dem Wasser schwimmen, wenn auch die Masse, aus der er besteht, schwerer ist als das Wasser; denn durch die Höhlung bekommt er ein großes Volumen, verdrängt viel Wasser, so daß das Gewicht des Wassers größer wäre, als das Gewicht des Körpers; deshalb schwimmt er. Mit Wasser gefüllt, geht er natürlich unter. Daher kommt es, daß man Schiffe ganz aus Eisen bauen kann, und daß sie doch noch eine große Tragfähigkeit haben.

Das archimedische Gesetz kann dazu dienen, um das Volumen eines unregelmäßig begrenzten Körpers zu finden (Steinbrocken, Glasstück, Münze u. s. w.). Man wägt den Körper in der Luft, er wiegt etwa 36,8 *g*, man bindet ihn an einen Faden, hängt ihn an die Wagschale, läßt ihn in ein untergestelltes Glas Wasser tauchen, und wägt ihn so im Wasser; er wiegt etwa 24,3 *g*, folglich hat er 12,5 *g* an Gewicht verloren; der Gewichtsverlust ist aber nach dem archimedischen Gesetz gleich dem Gewicht eines gleich großen Wasserkörpers; aber Wasser von 12,5 *g* Gewicht hat ein Volumen von 12,5 *ccm*, also ist das Volumen des Körpers auch 12,5 *ccm*.

27. Spezifisches Gewicht.

Jeder Stoff kann seinem Gewichte nach mit dem Gewichte eines gleich großen Volumens Wasser verglichen werden. **Die Zahl, welche angibt, wie viel mal ein Stoff schwerer ist als ein gleich großes Volumen Wasser, heißt sein spezifisches Gewicht** (abgekürzt sp. G.; deutsch: artbildendes Gewicht, ein Gewichtsverhältnis, durch das sich dieser Stoff von anderen Stoffen unterscheidet, ein dem Stoffe eigentümliches Gewichtsverhältnis).

Wenn man also sagt, das sp. G. des Eisens ist 7,5, so heißt das, das Eisen oder jedes Stück Eisen ist 7,5 mal schwerer als ein gleich großes Volumen Wasser. Auch für Körper, die in Wirklichkeit leichter sind als Wasser, gilt dieselbe Erklärung des sp. G. Man sagt deshalb das sp. G. des Holzes ist 0,5, d. h. Holz ist 0,5 mal schwerer als Wasser; 1 *cdm* Wasser wiegt 1 *kg*, 1 *cdm* Holz wiegt demnach $0{,}5 \cdot 1\ kg = 0{,}5\ kg$.

Um das spezifische Gewicht eines Körpers zu bestimmen, hat man verschiedene Methoden, von denen die meisten auf Anwendung des archimedischen Prinzipes beruhen.

1. Methode mittels Eintauchens. Man wägt den Körper in der Luft, er wiegt 26,4 *g* (a), dann hängt man ihn mittels eines feinen Fadens an die Wagschale, läßt ihn so in untergestelltes Wasser tauchen, und wägt ihn wieder; er wiegt 22,6 *g* (b); also hat er an Gewicht verloren 3,8 *g* (a—b); dieser Gewichtsverlust ist nach den Archimedischen Gesetze gleich dem Gewichte eines gleich großen Wasserkörpers, also wiegt ein gleich großer Wasserkörper 3,8 *g* (a—b). Nun kann man angeben, wie vielmal der Körper (26,4) schwerer ist als ein gleich großer Wasserkörper (3,8), nämlich:

$$\text{sp. G} = \frac{26,4}{3,8} = 6,95; \left(\text{sp. G.} = \frac{a}{a-b}\right)$$

Diese Methode paßt für feste Körper, die schwerer sind als Wasser und sich in Wasser nicht auflösen.

2. Methode des Eingießens, passend für flüssige Körper. Man nimmt ein Fläschlein mit engem Halse, an dem eine Marke eingraviert ist.

Ich wäge das Fläschlein leer	= 37,5 *g* = a
" " " mit der Flüssigkeit z. B. Petroleum bis an die Marke gefüllt,	= 147,8 *g* = b
ich wäge das Fläschlein mit Wasser ebenfalls bis zur Marke gefüllt,	= 162,7 *g* = c

so finde ich durch Abziehen:

das Gewicht des Petroleums	= 110,3 *g* = b—a
" " des gleich großen Volumens Wasser	= 125,2 *g* = c—a

$$\text{also sp. G. des Petroleums} = \frac{110,3}{125,2} = 0,88; \left(= \frac{b-a}{c-a}\right)$$

3. Methode mittelst eines Hilfskörpers, passend für flüssige Körper: ich wähle einen Körper, der sich weder im Wasser, noch in der zu untersuchenden Flüssigkeit (z. B. Spiritus) auflöst und in jeder untersinkt, also etwa ein Stück Glas, wäge nun

das Glas in der Luft	= 75,5 *g* = a
" " " dem Spiritus hängend	= 51,6 *g* = b
" " " dem Wasser hängend	= 45,4 *g* = c

Durch Abziehen finde ich den Gewichtsverlust in

Spiritus = 23,9 *g* = a—b, und den in

Wasser = 30,1 *g* = a—c; nach dem archimedischen Prinzip bedeutet das erste das Gewicht eines Volumens Spiritus, das so groß ist wie der eingetauchte Glaskörper; das zweite das Gewicht eines ebensogroßen Volumens Wasser; folglich ist das sp. G. des

$$\text{Spiritus} = \frac{23,9}{30,1} = 0,794; \left(\text{sp. G.} = \frac{a-b}{a-c}\right)$$

4. Die Methode mit Hilfe eines anderen spezifischen Gewichtes, passend für feste Körper, die sich in Wasser auflösen. Diese Methode beruht auf folgendem Satz: Das sp. G. eines Körpers in bezug auf Wasser ist gleich dem sp. G. des Körpers in bezug auf einen Hilfskörper mal dem sp. G. des Hilfskörpers in bezug auf Wasser, was man so schreiben kann:

$$\text{sp G}\,\frac{\text{K}}{\text{W}} = \text{sp G}\,\frac{\text{K}}{\text{H}} \cdot \text{sp G}\,\frac{\text{H}}{\text{W}};$$

oder: $\frac{\boxed{\text{K}}}{\boxed{\text{W}}} = \frac{\boxed{\text{K}}}{\boxed{\text{H}}} \cdot \frac{\boxed{\text{H}}}{\boxed{\text{W}}}$. Denn wenn man z. B. weiß, daß Blei 5 mal schwerer ist als Schwefelsäure, und Schwefelsäure 2 mal schwerer als Wasser, so folgt, daß das Blei 10 mal schwerer ist als Wasser, also

$$\text{sp G}\,\frac{\text{Blei}}{\text{Wass.}} = \text{sp G}\,\frac{\text{Blei}}{\text{Schwefels.}} \cdot \text{sp G}\,\frac{\text{Schwefels.}}{\text{Wasser}}$$
$$10 = 5 \;\cdot\; 2.$$

Will ich etwa das sp. G. des Kupfervitriols, der sich in Wasser auflöst, bestimmen, so wähle ich eine Flüssigkeit, in der sich der Kupfervitriol nicht auflöst, z. B. Petroleum, und suche das sp. G. des Kupfervitriols in bezug auf Petroleum nach der Methode des Eintauchens, finde etwa 1,84, suche dann das sp. G. des Petroleums in bezug auf Wasser, etwa nach der Methode des Eingießens, = 0,88, so ist das sp. G. des Kupfervitriols = 1,84 · 0,88 = 1,62.

5. Methode des Zusammenbindens, passend für feste Körper, die leichter sind als Wasser. Will ich etwa das sp. G. des Holzes finden, so wähle ich ein dazu passendes Stück Eisen oder Blei, so daß Holz und Blei zusammen im Wasser untersinken, und bestimme nun folgende Gewichte:

Blei in Luft = 38,7 *g* = a
Blei in Wasser = 35,2 *g* = b
Auftrieb des Bleies = 3,5 *g* = a—b
Holz in Luft = 18,6 *g* = a—c
Holz + Blei in Luft = 57,3 *g* = a+c
Holz mit Blei in Wasser = 22,8 *g* = d
Auftrieb von Holz + Blei = 34,5 *g* = a+c—d
Auftrieb von Blei = 3,5 *g* = a—b
Auftrieb des Holzes = 31 *g* = b+c—d

also sp. G. des Holzes $= \frac{18{,}6}{31} = 0{,}6 = \frac{\text{c}}{\text{b} + \text{c} - \text{d}}$.

6. Methode mittels des Nicholson'schen Aräometers. (Das erste Gewichtsaräometer wurde von Fahrenheit erfunden 1721.

Nicholson 1787.) Dasselbe besteht aus einem Cylinder aus Messingblech, der oben und unten spitz zuläuft und ganz geschlossen ist; unten ist ein Messingschälchen angebracht, das so schwer ist, daß der Cylinder vertikal, im Wasser schwimmmt; oben ist ein Drahthals angebracht, der am Ende ein Tellerchen trägt. Am Halse ist eine Marke eingraviert. Taucht man den Apparat in Wasser, so schwimmt er vertikal, sinkt aber nicht bis zur Marke ein. Man legt nun zuerst so viele Gewichte auf den Teller, bis der Apparat bis zur Marke einsinkt z. B. 3,046 g = a, entfernt die Gewichte, legt den Körper, dessen sp. G. man bestimmen will, auf den Teller und so viele Gewichte dazu, bis er wieder bis zur Marke einsinkt, 1,241 g = b, man findet dann das Gewicht des Körpers durch Abziehen = 1,805 g (a—b). Man entfernt den Körper und die Gewichte, legt den Körper in das unten hängende Schälchen und legt auf den Teller so viel Gewichte, bis der Apparat wieder bis zur Marke einsinkt = 2,179 g = c. Da der Körper im Wasser liegt, so erleidet er einen Auftrieb, weshalb ich oben mehr Gewichte auflegen muß; der Unterschied, nämlich 2,179 — 1,241 = 0,938 g (= c — b) gibt den Auftrieb, also das Gewicht des gleich großen Volumens Wasser; demnach ist das sp. G. $= \frac{1,805}{0,938} = 1,92; \left(= \frac{a-b}{c-b}\right)$.

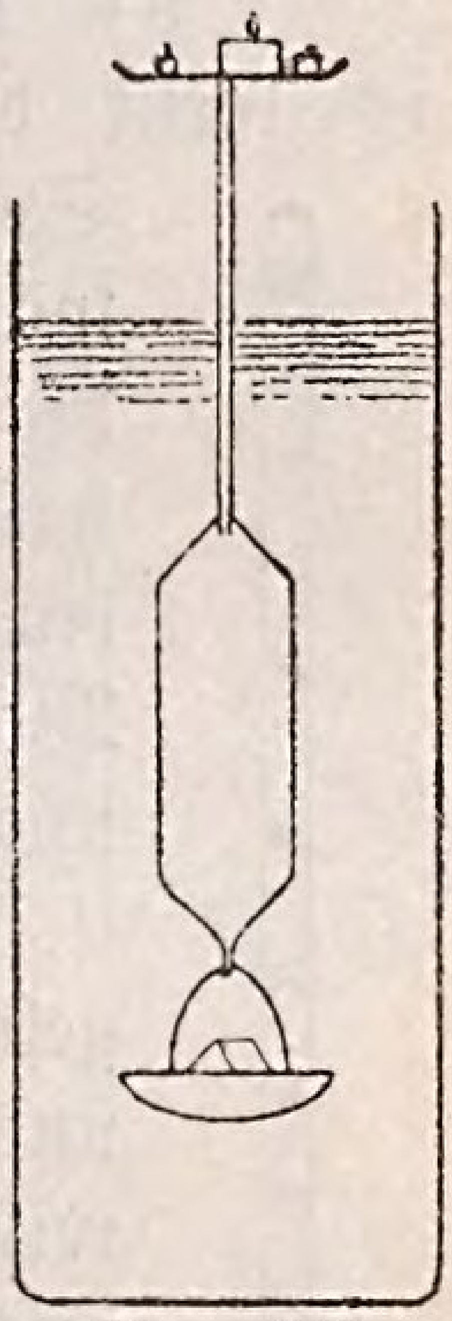


Fig. 38.

Diese Methode paßt für feste Körper, die sich im Wasser nicht auflösen (sind sie leichter als Wasser, so kann man sie am Schälchen anbinden); sie ist insbesondere bequem, weil man keine Wage braucht, und namentlich auch für solche Körper passend, die sich nicht gut anbinden lassen, wie Getreidekörner, Sand ꝛc.

7. Methode mittels der Skalenaräometer. Es kommt sehr häufig vor, daß man mit Stoffen zu thun hat, die entweder in Wasser aufgelöst sind, oder die mit Wasser vermischt sind; so sind Spiritus, Schwefelsäure, Salpetersäure u. s. w. stets mit Wasser vermischt, und im Salzwasser, im Most, in der Milch u. s. w. sind wertvolle Stoffe enthalten, nämlich Salz, Traubenzucker, Milchzucker, Käsestoffe und Fette u. s. w. Da nun diese Stoffe in der Regel ein anderes spezifisches Gewicht haben als das Wasser, so ist auch das spezifische Gewicht einer solchen Flüssigkeit von dem des Wassers verschieden und zwar um so mehr, je mehr von diesen Stoffen im Wasser enthalten ist. Wenn man also das sp. G. einer solchen Flüssigkeit kennt, so kann man daraus auf den Gehalt der Flüssigkeit an solchen Stoffen schließen und dadurch den Wert der Flüssigkeit bestimmen. Dies geschieht leicht mittelst des Skalenaräometers, dessen Einrichtung folgende ist.

Es besteht aus einer Glasröhre, die in der Mitte cylindrisch ausgebaucht ist; unten endigt sie in eine kleine Kugel, die mit

Schrotkörnern oder Quecksilber gefüllt ist, damit das Aräometer vertikal im Wasser schwimmt; oben läuft sie aus in den Hals, eine lange, überall gleich dicke Glasröhre, die oben geschlossen ist, und in deren Innerem eine Papierskala angebracht ist. Taucht man das Aräometer nun in eine Flüssigkeit, so taucht es stets so tief ein, bis das Gewicht der verdrängten Flüssigkeitsmasse gleich dem Gewichte des Aräometers ist; je leichter also die Flüssigkeit ist, je geringer ihr sp. G. ist, desto mehr muß das Aräometer verdrängen, desto tiefer sinkt es ein; je schwerer die Flüssigkeit ist, destoweiter steigt es heraus. Wie tief es einsinkt, kann man am Halse an der Skala ablesen. Die wichtigsten sind:

a) Das Alkoholometer oder die Spirituswage; es dient dazu, den Gehalt des gewöhnlichen Spiritus an reinem Spiritus (absolutem Alkohol) zu bestimmen, denn der gewöhnliche Spiritus ist stets mit Wasser vermischt. Das sp. G. des reinen Spiritus ist 0,794, das des Wassers = 1; deshalb taucht das Alkoholometer in reinem Spiritus fast ganz ein, und dort steht an der Skala, also oben, 0,794; in Wasser sinkt es so wenig ein, daß fast der ganze Hals herausschaut, deshalb steht dort unten 1. An dieser von 1 bis 0,794 laufenden Skala kann das sp. G. des Spiritus abgelesen werden. Im Handel und im Verbrauch interessiert uns aber mehr der Gehalt des gewöhnlichen Spiritus an reinem Spiritus; es ist deshalb für jedes sp. G. des Spiritus auch der Gehalt desselben an reinem Spiritus bestimmt worden (zuerst von Tralles) und zwar in % des Volumens, und auf der Skala ist neben dem sp. G. auch der Gehalt angegeben, laufend von 0% unten bis 100% oben. Sinkt also das Aräometer bis 75 ein, so bedeutet das, in 100 *l* dieses Spiritus sind enthalten 75 *l* reiner Spiritus und 25 *l* Wasser. Man nennt diese Prozente auch Volumprozente, Literprozente oder Prozente nach Tralles. Im Handel und bei der Versteuerung dienen sie als Grundlage der Wertbestimmung. Man sagt, 100 *l* à 100% = 10 000 *l* % (Literprozent), also 340 *l* à 82% = 27 880 *l*%; 10000 *l*% kosten etwa 38,4 ℳ, oder 10 000 *l*% müssen so und so viel ℳ Steuer entrichten; damit ist der Preis oder die Steuer dieses Spiritus leicht zu berechnen. An manchen Alkoholometern sind auch noch die Gewichtsprozente angegeben, nach Richter; 75% bedeuten: in 100 *kg* sind 75 *kg* Spiritus und 25 *kg* Wasser.

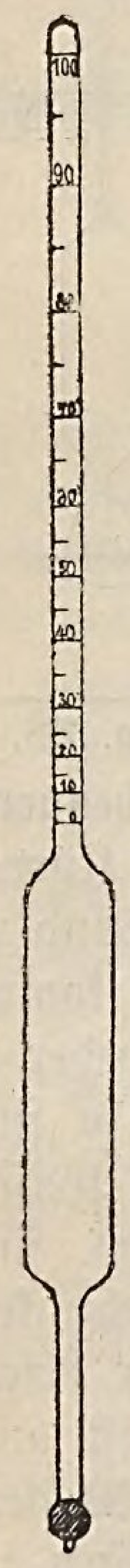


Fig. 39.

b) Salzwage oder Salzspindel, Aräometer für Salzwasser, gibt an, wie viel Gewichtsteile Kochsalz in 100 *l* Salzwasser enthalten sind; wird verwendet in den Salinen, um nachzusehen, ob die Soole schon genug Salz enthält, also sudwürdig ist. c) Laugenwage gibt an, wie viel Gewichtsteile Ätznatron oder Ätzkali in 100 *l* Lauge enthalten sind; wird vom Seifen-

sieder benützt. d) Bierwage gibt an, wie viel Gewichtsteile Malzzucker in der Würze enthalten sind, die man durch Kochen des Malzes erhält. e) Mostwage gibt ungefähr an, wie viel Traubenzucker im Moste enthalten ist. Die verbreitetste ist die von Öchsle (in Pforzheim); ziemlich willkürliche Skala, 0 ist Wasser, 100 bedeutet guten Most; dient dazu, ungefähr die Güte des Mostes zu prüfen, und den Käufer gegen nachträgliches Verdünnen des Mostes mit Wasser zu schützen. f) Milchwage, gibt das sp. G. der Milch an; wenn sie auf 31 steht, so bedeutet das, das sp. G. der Milch ist 1,031. Die Milch ist im allgemeinen um so gehaltreicher an Milchzucker, Käsestoff und Butter, je größer das sp. G. ist; Verdünnen mit Wasser macht sie leichter, die Milchwage sinkt tiefer; Abrahmen macht sie schwerer. Zeigt käufliche Milch bei der Untersuchung ein sp. G., welches erheblich von dem durchschnittlichen Werte guter Kuhmilch abweicht, so ist die Milch verdächtig; durch Vornahme einer Stallprobe kann man dann meist leicht entscheiden, ob sie gefälscht war. g) Für Schwefelsäure, Salzsäure, Salpetersäure, Essig 2c. hat man je ein besonderes Aräometer, das den Gehalt derselben an reiner Säure angibt.

Bemerkenswert sind die Aräometer von Baumé, von denen eines für leichte, das andere für schwere Flüssigkeiten bestimmt ist. Die Skaleneinteilung ist eine willkürliche, so daß sie weder sp. G. noch Gehalt direkt angeben. Da aber alle derartigen Aräometer mit derselben Skala versehen sind, so geben sie wenigstens direkt vergleichbare Angaben; sie waren früher vielfach gebräuchlich, werden aber jetzt durch die Aräometer, welche zugleich einen Gehalt angeben, verdrängt. Das Volumeter von Gaylüssac hat ein bestimmtes Gewicht (etwa 100 *g*) und läßt an seiner Skala erkennen, wie viele Volumteile (etwa *ccm*) einer Flüssigkeit es beim Schwimmen verdrängt.

Tabelle der specifischen Gewichte.

Platin (gezogen) . . .	23,00	Antimon (gegossen) . .	6,71
„ (gehämmert) . .	21,36	(Diese Stoffe bis hieher nennt	
Gold (gehämmert) . .	19,36	man die Schwermetalle.)	
„ (gegossen) . . .	19,26	Aluminium	2,57
Quecksilber . . .	13,596	Magnesium	1,75
Blei (gegossen) . . .	11,35	Natrium	0,972
Palladium	11,30	Kalium	0,862
Silber (gehämmert) . .	10,51	Lithium	0,59
„ (gegossen . . .	10,47	(Diese Stoffe heißen Leicht-	
Wismut (gegossen) . .	9,82	metalle.)	
Kupfer (gehämmert) . .	9,00	Chrom	5,90
„ (gegossen) . . .	8,788	Jod	4,95
Glockenmetall	8,81	Diamant	3,53
Kobalt	8,51	Graphit . . .	1,8—2,23
Messing	8,39	Schwefel	2,03
Nickel	8,28	Phosphor	1,77
Stahl	7,82		
Schmiedeisen	7,79	Schwerspat	4,47
Gußeisen	7,21	Flintglas . . .	3,20—3,70
Zinn	7,26	Glas	2,49
Zink (gegossen) . . .	6,86	Flußspat	3,14
Mangan	6,85	Turmalin	3,08

Alabaster	2,87
Granit	2,80
Marmor (carrarisch)	2,72
Gneis	2,71
Bergkrystall	2,69
Smaragd	2,68
Thonschiefer	2,67
Basalt	2,66
Quarz	2,62
Porphyr	2,60
Feldspat	2,57
Kalkstein (dichter)	2,45
Sandstein	2,35
Porzellan	2,38—2,15
Zement	3,05
Mörtel	1,6—1,9
Backstein	1,47
Gyps (gegossen u. getrocknet)	0,97
Potasche	2,26
Glaubersalz	2,25
Steinsalz	2,14—2,41
Kochsalz	2,08
Eisenvitriol	1,84
Alaun	1,71
Bittersalz	1,66
Salpeter	1,62
Elfenbein	1,92
Knochen	1,8—2
Bernstein	1,08
Pech	1,15
Harz	1,06
Honig	1,46
Wachs	0,97
Ebenholz	1,19
Eichenholz (frisch)	0,95
„ (trocken)	0,75
Buchenholz	0,75
Birkenholz	0,74
Ahornholz	0,65

Kiefernholz (frisch)	0,64
„ (trocken)	0,55
Lindenholz	0,56
Lerchenholz	0,47
Tannenholz (frisch)	0,54
„ (trocken)	0,45
Pappelholz	0,38
Kork	0,24
Äther	0,71
Alkohol reiner bei 0°	0,807
„ „ „ 15°	0,794
Olivenöl	0,915
Terpentinöl	0,872
Mohnöl	0,91
Repsöl	0,91
Steinöl	0,75—0,84
Meerwasser	1,026
Schwefelsäure	1,843
Salpetersäure	1,51
Salzsäure	1,21
Essigsäure	1,063
Milch	1,029—1,034
Fette	0,92—0,94
Kalkstein (roh)	1,44
„ (gebrannt	0,884
„ gelöscht (trocken)	0,5
„ „ (fester Teig)	1,33
Dammerde, locker trocken	1,32
„ nat. feucht	1,6
„ naß	1,91
Sand trocken	1,4—1,74
„ nat. feucht	1,66
„ durchnäßt	1,95
Lehm trocken	1,50
„ nat. feucht	1,87
Lehm naß	1,98
Kies, trocken	1,73
„ feucht	1,80
Roggen, gehäuft	0,69—0,78
Weizen „	0,71—0,81

28. Anwendung des spezifischen Gewichtes.

Außer den schon angegebenen Anwendungen des sp. G. zur Bestimmung des Gehaltes von Flüssigkeiten gibt es noch viele an=

dere Anwendungen. So dient es dazu, zwei Stoffe, die dem Anblicke nach einander ähnlich sind, von einander zu unterscheiden, insbesondere manche Gesteinsarten; oder um zu untersuchen, ob eine Münze ächt ist, ob sie z. B. ganz aus Gold besteht, oder aus einem andern Metall und bloß vergoldet ist. Man bestimmt zu diesem Zwecke das sp. G. der Münze und vergleicht es mit dem bekannten sp. G. des Goldes.

Man kann ferner mittelst des sp. G. das wirkliche oder absolute Gewicht eines Körpers berechnen nach der Regel:

Gewicht = Volumen × sp. G.

Denn wenn ich das Gewicht eines Steinblockes berechnen soll, so messe ich sein Volumen, es sei 548 *cdm*, und schließe dann: ein Wasserkörper, so groß wie der Steinblock also 548 *cdm* groß, wiegt 548 *kg*; der Stein aber, dessen sp. G. 2,6, ist 2,6 mal schwerer als ein gleich großer Wasserkörper, wiegt also $548 \cdot 2{,}6$ *kg*. Man findet also das Gewicht eines Körpers, wenn man sein Volumen mit dem sp. G. multipliziert. Ist das Volumen in *cdm* ausgedrückt, so ergibt sich das Gewicht in *kg*, ebenso entsprechen sich *ccm* und *g*, *cbm* und *t*. Man kann auch so sagen: wenn das sp. G. des Eisens 7,5 ist, so wiegt 1 *cdm* Eisen 7,5 *kg*, wenn das sp. G. des Holzes 0,6 ist, so wiegt 1 *cdm* Holz 0,6 *kg* u. s. w. Deshalb sagt man auch häufig, das sp. G. ist das Gewicht einer Raumeinheit eines Körpers, oder das sp. G. gibt an, wie viel *kg* oder *g* 1 *cdm* oder 1 *ccm* eines Körpers wiegt.

Beispiele: Was wiegt ein Eisenstab von 2,4 *m* Länge, 4,5 *cm* Breite, 8,1 *mm* Dicke, sp. G. 7,6?

$$G = 240 \cdot 4{,}5 \cdot 0{,}81 \cdot 7{,}6\ g.$$

Bei Mehl bezieht sich das sp. G. auf das in einem Raume befindliche Mehl mit Einschluß der zwischen den Mehlstäubchen befindlichen Luft, nicht auf das Gewicht des Mehlstoffes selbst. Ähnliches kommt öfter vor. So ist das sp. G. der Getreidekörner größer als 1, denn sie sinken in Wasser unter; betrachte ich aber das Gewicht des etwa in einem *l* oder *hl* enthaltenen Getreides, wobei offenbar nicht der ganze Raum mit Getreide angefüllt ist, und vergleiche dies Gewicht mit dem Wasser, so ist dieses (durch die Methode des Eingießens, Einfüllens) erhaltene sp. G. kleiner als 1, etwa 0,81. Ähnliches gilt für Sand, Kies, Steinkohlen, Erde und ähnliche in einem Raum mit Zwischenräumen geschüttete Körper. Bezieht sich das sp. G. auf den Körper mit Zwischenräumen, so sagt man statt sp. G. wohl auch Volumgewicht.

Umgekehrt kann man aus dem Gewicht und dem sp. G. wieder das Volumen finden, wenn man das Gewicht durch das sp. G. dividiert. Will ich wissen, welches Volumen ein Eisenblock von 358 *kg* hat, wenn das sp. G. des Eisens 7,6 ist,

so weiß ich, 1 *cdm* Eisen wiegt 7,6 *kg*, also hat der Eisenblock so viele *cdm* als 7,6 *kg* in 358 *kg* enthalten ist, also Vol. $= \frac{358}{7{,}6}$ *cdm*.

Beide Gesetze, so wie das frühere: sp. G. $= \frac{\text{Gew.}}{\text{Volumen}}$ hängen algebraisch zusammen.

Das sp. G. dient dazu, das Gewicht zu berechnen, wenn man den Körper seiner Natur nach gar nicht auf die Wage legen kann, z. B. Erdmassen, große Balken und Metallstücke; oder wenn es unbequem wäre, dieselben zu wägen, z. B. Flüssigkeiten, Getreide, welche man leichter dem Volumen nach messen kann; oder wenn der Körper, dessen Gewicht berechnet werden soll, noch gar nicht vorhanden ist, und man nur sein Volumen und sein sp. G. kennt; z. B. beim Ausheben eines Grabens soll im voraus das Gewicht der Erde berechnet werden, oder beim Bau eines Hauses, einer Brücke soll im voraus das Gewicht der zur Verwendung kommenden Materialien berechnet werden. Ähnlich ist es, wenn das Volumen eines Körpers berechnet werden soll.

29. Kommunizierende Röhren oder Gefäße.

Wenn zwei Röhren oder Gefäße unten durch eine Röhre verbunden sind, so sagt man, sie kommunizieren. **In kommunizierenden Gefäßen steht das Wasser beiderseits gleich hoch;** die Verbindungslinie der beiden Oberflächen ist horizontal; dabei ist es gleichgültig, welche Form oder Größe die Röhren oder Gefäße haben. In irgend einem Querschnitt der Verbindungsröhre wird das Wasser von beiden Seiten gedrückt nach den Gesetzen des Seitendruckes, und ist dann in Ruhe, wenn die Kräfte von rechts und links gleich groß sind; diese Kräfte hängen aber, da die Fläche beiderseits dieselbe ist, bloß ab von der Höhe des Wassers, sind also gleich, wenn die Wasserhöhen rechts und links gleich sind. Steht das Wasser in beiden Röhren ungleich hoch, so fließt so lange Wasser von der höheren in die niedrigere, bis es beiderseits gleich hoch steht.

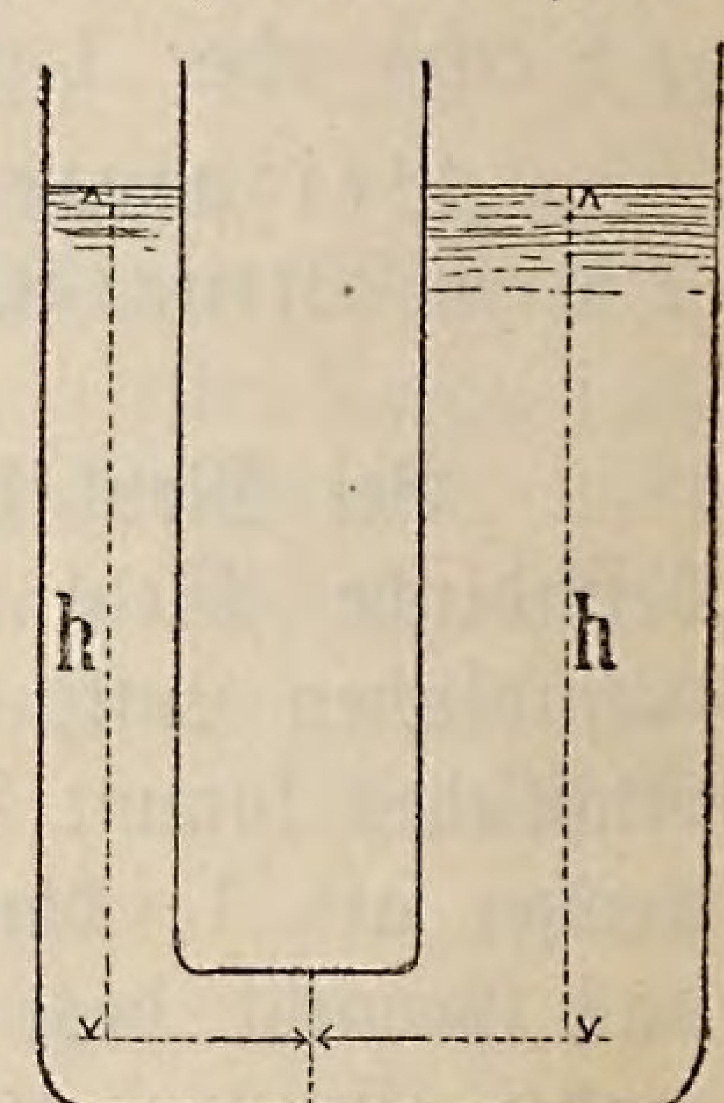


Fig. 40.

Auch das in einem Gefäß befindliche Wasser ist nur dann in Ruhe, wenn seine Oberfläche horizontal ist, weil nur dann sämtliche Punkte der Oberfläche von einem beliebigen unten liegenden Punkte, gleich weit in vertikaler Richtung abstehen, also gleichen Druck auf ihn ausüben. Ist die Oberfläche des Wassers nicht horizontal, so fließt das Wasser von der höheren Stelle zur niedrigeren.

Große Wasserflächen, wie das Meer oder große Meerestheile, sind zwar auch an jedem Punkte ihrer Oberfläche horizontal, d. h. ihre Oberfläche steht senkrecht zur Richtung der Schwerkraft; aber sie sind nicht mehr eben, sondern gekrümmt, und sind Teile der kugeligen

Oberfläche der Erde. Schon bei ziemlich kleinen Seen, wie beim Bodensee ist die Krümmung des Wasserspiegels deutlich erkennbar. Bei kleineren Wasserflächen ist diese Krümmung so gering, daß man sie nicht merkt, weshalb man die Fläche als eben ansehen kann.

30. Anwendungen der kommunizierenden Röhren.

Die Wasserwage oder Kanalwage dient dazu, um zu messen, um wie viel eine Straße, ein Kanal ꝛc. steigt oder fällt. Sie besteht aus einer auf einem Dreifuß horizontal befestigten Blechröhre, an deren Enden zwei Glasröhren vertikal nach aufwärts gehen. Sie ist mit Wasser so weit gefüllt, daß auch die Glasröhren noch etwa halb voll sind. Stellt man sie auf, so stehen die beiden Wasserspiegel in den Glasröhren gleich hoch, schaut man längs derselben fort, so ist diese Gesichtslinie horizontal. Ich messe nun den Abstand des einen Wasserspiegels vom Boden etwa 136 *cm* und schaue dann längs beider Wasserspiegel auf eine in *cm* geteilte Meßlatte, die ein Gehilfe in einiger Entfernung senkrecht auf den Boden gestellt hat, und sehe etwa, daß die Gesichtslinie dort 49 *cm* vom Boden trifft; da die Gesichtslinie horizontal ist, so ist die Straße von meinem Standpunkte bis zur Meßlatte um $136 - 49 = 87$ *cm* gestiegen. So fährt man von Strecke zu Strecke weiter. Dies nennt man nivellieren, d. h. die Form der Oberfläche oder des Niveaus aufsuchen.

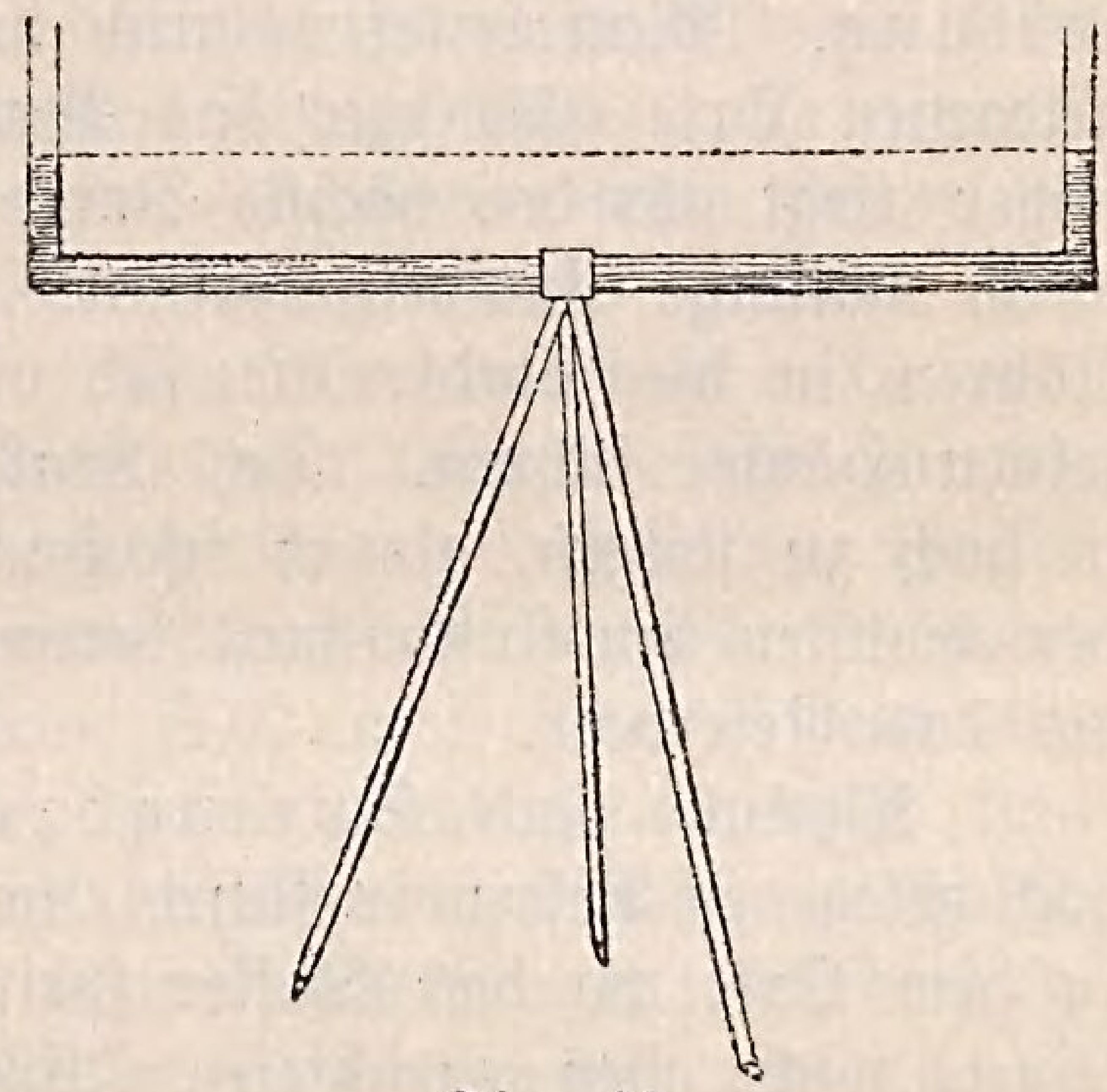


Fig. 41.

Die Libelle (Hooke 1703). Die Röhrenlibelle besteht aus einer Glasröhre, die sehr schwach gekrümmt oder gegen die Mitte ein wenig ausgebaucht ist. Sie ist mit Wasser, oder besser mit Weingeist (weil dieser nicht gefriert und leichtflüssiger ist) gefüllt, jedoch nur so weit, daß noch eine Luftblase vorhanden ist. Sie ist auf beiden Seiten geschlossen, wird horizontal, die Krümmung nach oben gerichtet, auf ein Lineal so festgeschraubt, daß, wenn das Lineal genau horizontal steht, die Luftblase genau in der Mitte der Röhre steht. Da die Luftblase immer den höchsten Teil der Röhre einzunehmen sucht, so kann man die Libelle dazu benützen, um zu untersuchen, ob ein Gegenstand horizontal steht; man setzt das Lineal auf und beobachtet den Stand

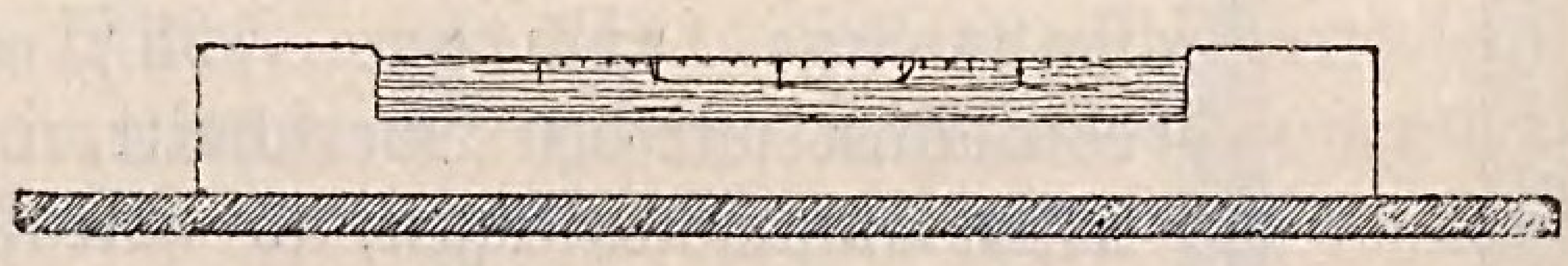


Fig. 42.

der Luftblase: rückt die Luftblase gegen das eine Ende der Röhre, so ist der Gegenstand nach dieser Richtung hin höher. So benützt man sie zum Horizontalstellen von Tischen, Uhrgehäusen, Stativen von Wagen, Billards, Meßtischen ꝛc. und die Maurer, Pflasterer, Zimmerleute ꝛc. benützen auch häufig solche Setzlatten, in welche oben eine Libelle eingesetzt ist. Libellen werden auch auf Fernrohre aufgesetzt, um dieselben horizontal zu stellen, und ein solches Fernrohr (Nivellierinstrument) dient dann ähnlich wie die Wasserwage zum Nivellieren. Dosenlibelle.

Kommunizierende Röhren benützt man auch bei der Wasserleitung. Man leitet nämlich durch einen Kanal von einem hochgelegenen Orte (Gebirge) das Wasser in ein großes Reservoir, das höher liegt als der höchste Punkt der Stadt, oder man schafft es durch mächtige Pumpen dorthin. Von diesem Hochreservoir führen Röhren in die Stadt, die sich vielfach verzweigen und in die einzelnen Häuser führen. Das Wasser sucht in diesen Leitungsröhren so hoch zu steigen, als es im Hochreservoir ist, fließt also selbst bei den höchsten Ausflußhähnen heraus, da diese noch niedriger liegen als das Reservoir.

Ähnlich sind Springbrunnen eingerichtet. Von einem hoch gelegenen Reservoir führt eine Röhre herunter, läuft weiter bis zu dem Ort, wo das Wasser springen soll, und endigt dort in einer feinen nach oben gerichteten Öffnung. Wenn diese Öffnung tiefer liegt als der Wasserspiegel im Reservoir, so sucht das Wasser in diesem kurzen Schenkel eben so hoch zu steigen, als im Reservoir, springt deshalb aus der Öffnung heraus und würde eben so hoch steigen, als es im Reservoir steht, wenn es nicht durch den Luftwiderstand etwas zurückgehalten würde.

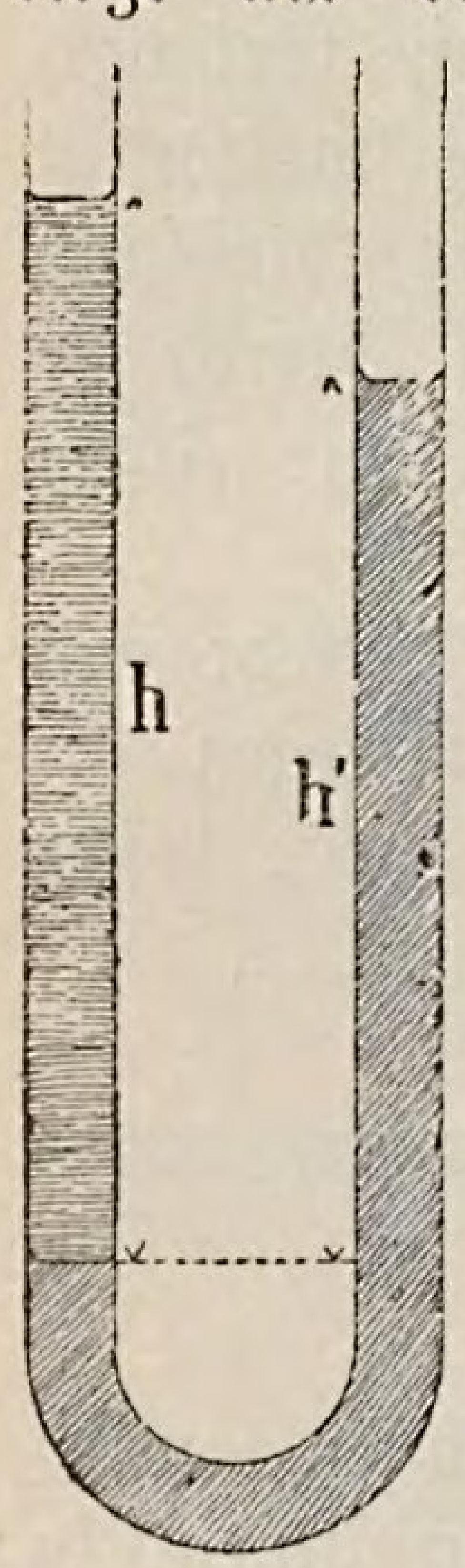


Fig. 43.

In kommunizierenden Röhren steht die Flüssigkeit nur dann gleich hoch, wenn beiderseits dieselbe Flüssigkeit sich befindet. Sind aber verschiedene Flüssigkeiten von verschiedenem sp. G. in den Röhren, so steht die leichtere Flüssigkeit höher. Denn betrachten wir den Querschnitt, in welchem beide Flüssigkeiten zusammenstoßen, so hält sich das, was unterhalb ist, selbst das Gleichgewicht; der Querschnitt also ist in Ruhe, wenn auch der Druck der Flüssigkeitssäulen, die rechts und links über ihm stehen, beiderseits derselbe ist. Diese Drücke sind gleich den Gewichten der Flüssigkeitssäulen; da aber die sp. G. der Flüssigkeiten verschieden sind, so müssen auch die Höhen derselben verschieden sein, damit die Gewichte einander gleich sind, und zwar müssen sich die Höhen verhalten wie umgekehrt die sp. G. Diesen Satz kann man benützen, um die sp. G. von Flüssigkeiten zu bestimmen, die sich

nicht mischen; ist nämlich in der einen Röhre Wasser 12 *cm* hoch, in der anderen Öl 13,6 *cm* hoch, so ist 13,6 : 12 = 1 : x, also $x = \frac{12}{13,6} = 0,88$; das ist das sp. G. des Öles.

31. Brunnen und Quellen.

Auf dem Gesetze der kommunizierenden Röhren beruhen auch die Brunnen und Quellen. Man unterscheidet dreierlei Arten von Brunnen.

1. Die Grundwasserbrunnen. Fließt ein Fluß oder Bach in einem Thale, so hat er dort meist große Mengen Kies und Sand abgesetzt, die den Boden des Thales bilden und oft tief hinabreichen; unter diesem Gerölle oder angeschwemmten Lande befindet sich dann festes Gestein. Die Zwischenräume zwischen den Steinen des Kieses und zwischen den Sandkörnern sind alle mit Wasser gefüllt und zwar bis hinab zum festen Gestein und bis zu einer Höhe, die gleich ist der Höhe des Wassers im Flusse. Diese Wassermasse, welche bei breitem Thale sehr groß ist, wird das Grundwasser genannt. Sein Spiegel steigt, wenn der Fluß steigt, und fällt auch mit ihm, jedoch nicht gleichmäßig, sondern langsamer, weil das Wasser sich nur schwer zwischen den Sandkörnchen fortbewegt. Die über dem Grundwasserspiegel liegende Erd- und Sandmasse ist nur feucht. Einen Grundwasserbrunnen macht man, indem man einen Brunnenschacht gräbt bis unter den tiefsten Stand des Grundwasserspiegels. In folgender Figur bei y. Das Wasser dringt unten von allen Seiten in den Brunnenschacht, stellt sich so hoch, als der Grundwasserspiegel ist, steigt und fällt mit diesem; ist der Brunnen nicht tief genug gegraben, so kann er, wenn der Grundwasserspiegel sinkt, vertrocknen oder versiegen.

Das Wasser der Grundwasserbrunnen ist meist sehr gut. Man möchte glauben, daß es meistens schlecht und verdorben sei; denn es gelangt in dasselbe das Flußwasser, das, da in ihm tierische und pflanzliche Stoffe sich befinden und verwesen, oft recht unrein und unappetitlich ist; zudem sickert das Regenwasser durch die oberen Erdschichten, gelangt ins Grundwasser und könnte wohl von der Erde, von dem auf den Acker gefahrenen Miste und von den dort verwesenden Pflanzenstoffen auch viele schlechte Stoffe mit in das Grundwasser bringen. Das ist aber nicht der Fall, sondern solche lockere Erdmassen, wie Kies, Sand, besonders aber Ackererde haben die Fähigkeit, das durch sie durchsickernde Wasser sogar zu reinigen, sie sind im stande, die im Wasser aufgelösten Stoffe, die von der Verwesung der Tiere und Pflanzen herkommen und besonders auch im Miste enthalten sind, fest zu machen und zurückzubehalten und nur das reine Wasser durchlaufen zu

lassen. Die Pflanzen nehmen durch ihre Wurzeln diese von der Erde zurückgehaltenen Stoffe auf und machen den Boden zur Aufnahme weiterer solcher Stoffe bereit. Deshalb ist das Grundwasser meist sehr gut, gesund und wohlschmeckend. Jedoch ist das Grundwasser schlecht, wenn der Brunnen zu nahe am Flusse oder Bache selbst steht, oder wenn sehr viele tierische und pflanzliche Verwesungsprodukte in den Boden einsickern, so daß die Erde nicht mehr alle festzumachen im stande ist, da sie gleichsam mit solchen Stoffen schon gesättigt ist, und wenn keine Pflanzendecke diese Stoffe wieder wegschafft. Dies ist insbesondere der Fall in Städten, wo durch die Abtritte, Dungstätten, Straßenrinnen, Küchenausgüsse und porösen Kanäle Unmassen von verwesenden Stoffen in das Grundwasser gelangen, und es nicht bloß schlecht schmeckend und unappetitlich, sondern sogar gesundheitsschädlich machen; denn in solcher mit verwesenden Stoffen erfüllten Erde vermehren sich die Keime vieler Krankheiten, die dann durch das Grundwasser dem Menschen zugeführt werden. Man führt deshalb den Städten gutes Wasser durch Wasserleitungen zu und hat dafür zu sorgen, daß das Grundwasser nicht zu sehr verunreinigt wird; dies geschieht durch Abfuhr der vom Menschen ausgeschiedenen Stoffe (Exkremente, Fäkalien), Zementieren der Abtrittgruben und Kanalisation. Auch ist das Grundwasser schlecht, wenn sein Spiegel hoch, also nahe an der Erdoberfläche liegt, und wenn die dort befindliche Erde aus sumpfigem, morastigem, schlammigem Material besteht.

2. Die Quellbrunnen und Quellen. Unterhalb des angeschwemmten Landes befindet sich festes Gestein; auch sämtliche Berge bestehen aus solchem und sind nur außen mit einer meist nicht dicken Schichte von verwittertem Gestein und Erde überdeckt, worauf die Pflanzen wachsen. Es besteht also die ganze feste Erdkruste aus Steinen. Diese sind meist zerrissen, zerspalten, zerklüftet und deshalb durchlässig für einsickerndes Regenwasser. Es gibt aber auch Gesteinsarten, die keine solchen Risse und Spalten haben und deshalb das Wasser nicht durchlassen, also undurchlässig sind. Das Wasser fließt demnach in den Rissen des durchlässigen Gesteines nach abwärts, bis es auf eine undurchlässige Schichte kommt, staut sich dann, und füllt so die Risse des durchlässigen Gesteines immer höher an. Solche Risse sind manchmal ziemlich dick und heißen dann Wasseradern. Wenn nun ein solcher Riß oder Spalt an die Oberfläche der Erde tritt, und diese Stelle tiefer liegt als die Höhe, bis zu welcher die Risse im Berge mit Wasser gefüllt sind, so läuft das Wasser aus diesem Spalt und bildet eine natürliche Quelle (bei x). Quellen finden sich demnach zumeist am Fuße von Bergen und Hügeln. Einen Quellbrunnen bekommt man, wenn man zuerst die oberste, lockere Erdschichte wegschafft und dann ein 1—2 *m* breites Loch in den Felsen gräbt

oder sprengt, bis man auf einen wasserführenden Spalt trifft (bei q). Quellwasser ist meist sehr gut, da es beim Durchsickern durch die lockere Erdschichte und durch die langen Gänge im Felsen nicht nur von den schlechten Beimischungen gereinigt wird, sondern von den Steinen noch etwas auflöst, insbesondere Kalk, was ihm dann einen angenehmen Geschmack verleiht. Manchmal kommt das Wasser durch Gesteinsschichten, die leicht auflösbare Stoffe enthalten; dieselben werden dann vom Wasser aufgelöst und sind dann im Quellwasser enthalten, so besonders Kochsalz, viele ähnliche Salze,

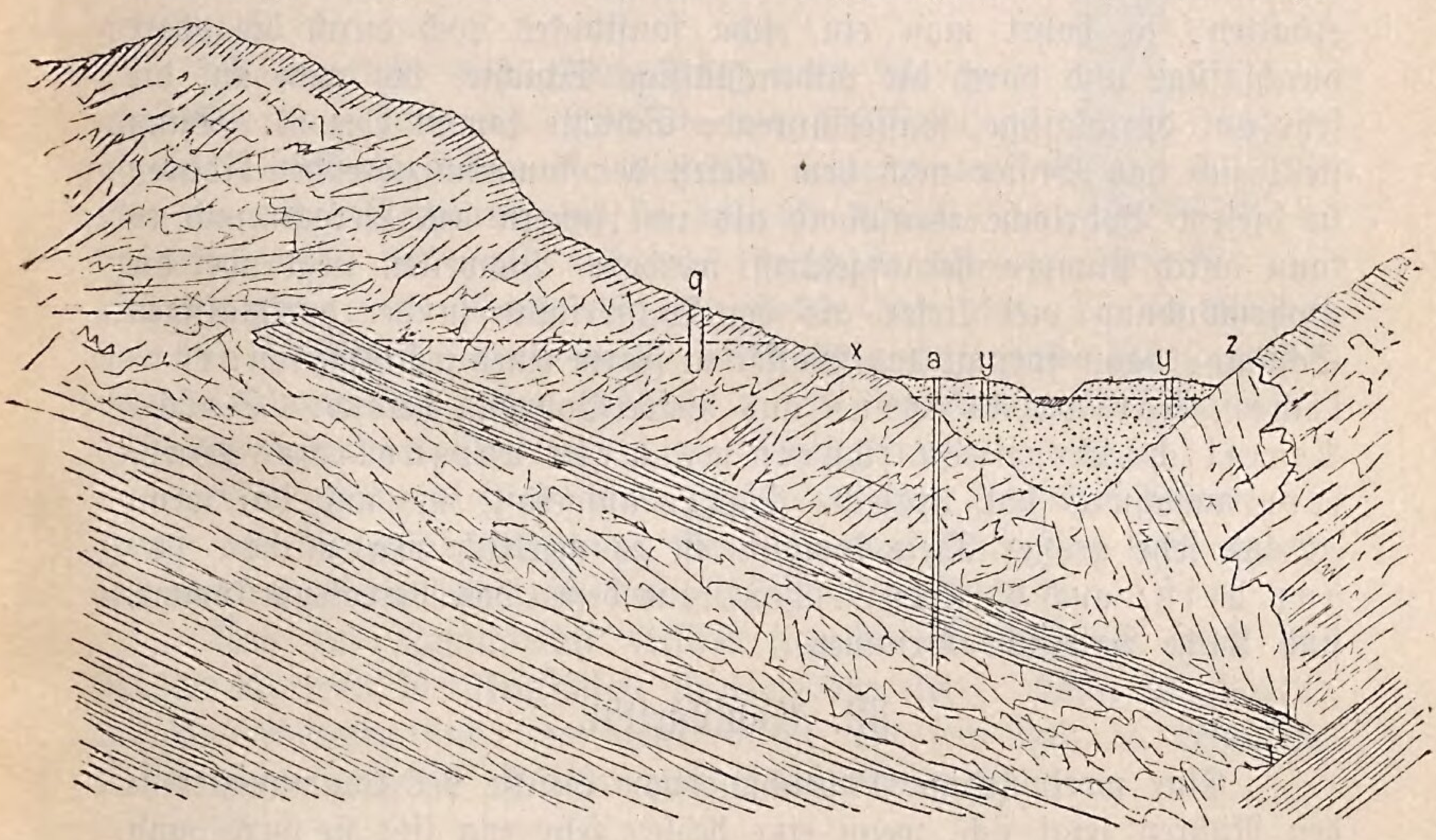


Fig. 44.

schwefelhaltige, eisenhaltige Stoffe u. s. f. Solche Quellen sind dann besonders gesucht als Salzquellen oder als Heilquellen (Schwefelquellen, Stahlquellen, Bitterquellen, Säuerlinge 2c.).

3. Artesische Brunnen, so genannt von der Grafschaft Artois in Frankreich, weil sie dort zuerst gebohrt wurden. Nicht überall auf der Erde kann man solche Brunnen herstellen, denn es ist dazu eine eigentümliche Lagerung der Gesteinsschichten erforderlich, nämlich folgende: Zuoberst liegt ein durchlässiges Gestein, unter diesem etwas schräg nach abwärts führend eine undurchlässige Schichte, die aber nicht durch den ganzen Berg geht, sondern einen großen Teil für die durchlässige Schichte noch frei läßt. Auf die undurchlässige Schichte folgt eine sehr gut durchlässige, die also mit der oberen durchlässigen in Verbindung steht, so daß das einsickernde Wasser bis zu ihr herabkommt. Liegt nun weiter nach abwärts noch eine undurchlässige Schichte, die viel weiter nach der einen Seite reicht als die obere undurchlässige, und das Wasser nicht mehr weiter nach abwärts dringen läßt, so staut sich

das Wasser zwischen den zwei undurchlässigen Schichten an, füllt den ganzen Raum zwischen ihnen aus, indem es sich in den Gängen der durchlässigen Schichte befindet. Führt zufällig ein Spalt durch die obere durchlässige Schichte bis zur Oberfläche der Erde, so wird das Wasser in ihm in die Höhe steigen und, wenn es im Innern des Berges hoch genug steht, als Quelle zum Vorschein kommen (bei z), möglicherweise in großer Entfernung von dem Berge, auf dem das Wasser eingedrungen ist; denn diese Gesteinsschichten ziehen oft weiter fort. Will man dieses Wasser mittels eines Brunnens erhalten, so bohrt man ein etwa faustdickes Loch durch die obere durchlässige und durch die undurchlässige Schichte, bis man auf die sehr gut durchlässige, wasserführende Schichte kommt (bei a). Dann stellt sich das Wasser nach dem Gesetz der kommunizierenden Röhren in diesem Bohrloche ebensohoch als im Innern des Berges und es kann durch Pumpen heraufgeschafft werden. Bisweilen liegt aber die Bohrmündung viel tiefer als der Wasserstand in der durchlässigen Schichte; dann springt das Wasser in Form eines mächtigen *natürlichen Springbrunnens* aus dieser Bohrung heraus. *Solche Artesische Brunnen führen meist ein vorzügliches Wasser*; manchmal hat dasselbe *Salze* aufgelöst, hie und da, wenn es aus sehr großer *Tiefe* kommt, ist es merklich *warm*, ja *sogar heiß*; auch die *Ölquellen*, aus denen das Petroleum kommt, sind solche Artesische Brunnen.

32. Kapillarität.

Eine merkwürdige Abweichung vom Gesetze der kommunizierenden Röhren zeigt sich, wenn eine Röhre sehr eng ist; sie wird dann ein *Haarröhrchen* oder *Kapillarrohr* genannt. Man findet dann: wenn die Röhre von der Flüssigkeit benetzt wird, wie Glas von Wasser, so steht das Wasser in der Haarröhre höher als in der weiten Röhre und ist an der oberen Fläche nicht eben, sondern nach abwärts gekrümmt, es hat einen *konkaven Meniskus*. Wird die Röhre von der Flüssigkeit nicht benetzt (Glas und Quecksilber), so steht die Flüssigkeit im Haarröhrchen tiefer als im weiten Rohr und ist an der oberen Fläche nach aufwärts gekrümmt, hat einen *konvexen Meniskus*. Dasselbe findet man, wenn man das Kapillarrohr in eine Flüssigkeit taucht, die sich in irgend einem Gefäße befindet.

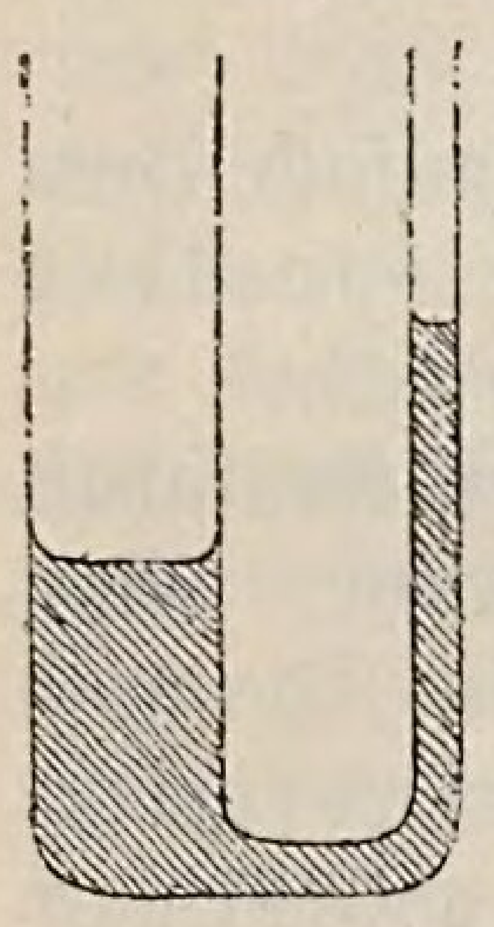
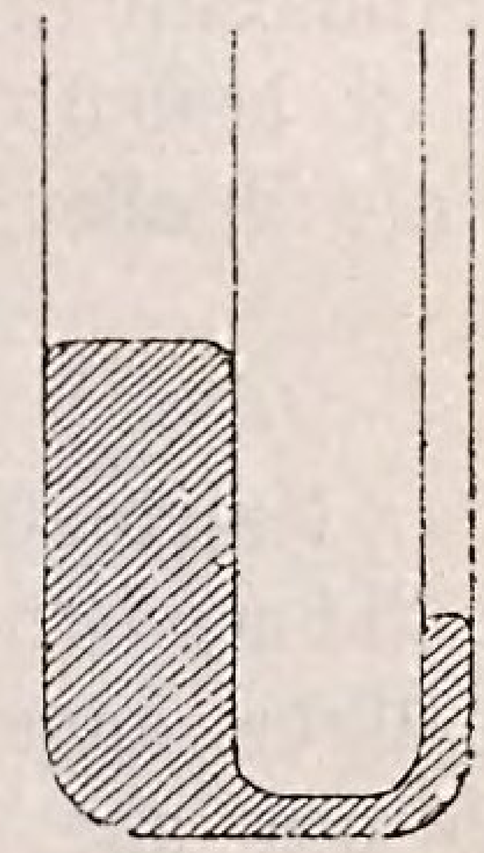


Fig. 45.

Durch Versuche fand man: die Höhe, um welche die Flüssigkeit im Rohre höher (oder tiefer) steht als im Gefäße, ist um so größer, je kleiner der Durchmesser ist, und ist dem Durchmesser umgekehrt proportional; sie ist fast gar nicht abhängig von dem Stoffe, aus welchem die Röhre besteht, wenn nur die Röhre voll-

kommen (oder gar nicht) benetzt wird; sie ist vom sp. G. der Flüssigkeit abhängig, demselben umgekehrt proportional; je geringer das sp. G. ist, desto größer ist die Steighöhe.

Damit verwandt ist die Erscheinung des gekrümmten Randes einer Flüssigkeitsoberfläche. Das Wasser (Öl 2c.) in einem weiten Glase (benetzten Gefäße) hat eine ebene Oberfläche; aber an den Rändern ist sie nach aufwärts gekrümmt; Quecksilber in einem Glasgefäß (wenn keine Benetzung stattfindet) ist am Rand nach abwärts gekrümmt.


Fig. 46.

Man erklärt diese Erscheinung durch die gegenseitige Anziehung der Moleküle der Flüssigkeit; an der Oberfläche haben die Moleküle keine weiter oben liegenden Nachbarn, die sie anziehen könnten; deshalb bleibt die nach aufwärts gerichtete Anziehung übrig; am Rande der Flüssigkeit sind aber, da die Röhre von der Flüssigkeit benetzt wird, solche oberhalb liegende Flüssigkeitsmoleküle vorhanden, die auf die unten liegenden einen Zug nach aufwärts hervorbringen und so die Flüssigkeitssäule heben.

Man nennt diese in einer Haarröhre zum Vorschein kommende Kraft auch Kapillarattraktion, wenn sie die Flüssigkeit hebt, oder Kapillardepression, wenn sie die Flüssigkeit herabdrückt.

Aus der Kapillarität erklärt sich die Erscheinung, daß in porösen Körpern die Flüssigkeit in die Höhe steigt, wobei die Poren die Haarröhrchen sind; da dieselben oft sehr fein sind, so steigt in ihnen die Flüssigkeit oft sehr hoch (feuchte Wände).

Dritter Abschnitt.

Lehre von den luftförmigen Körpern.

33. Gewicht luftförmiger Körper.

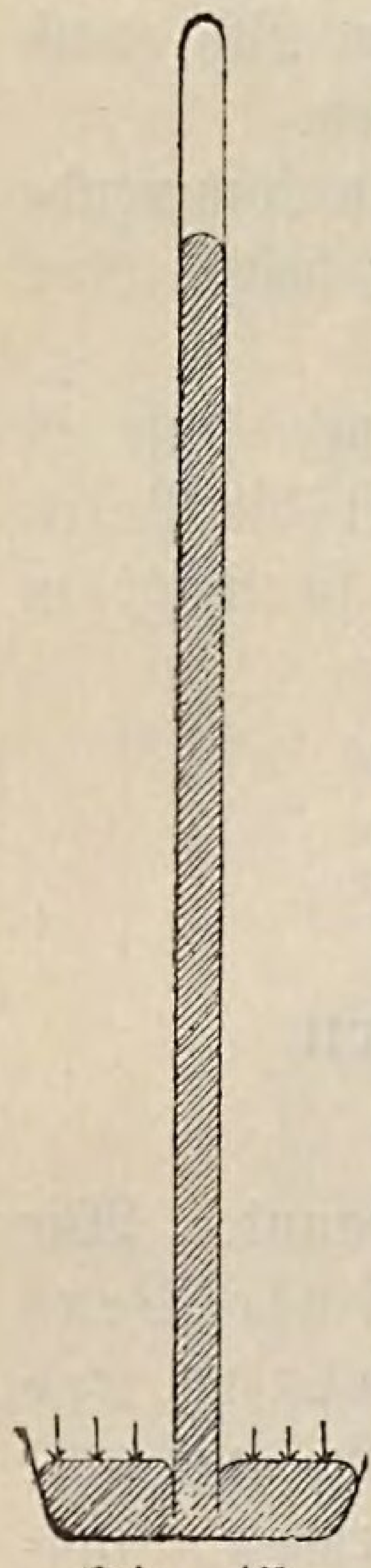
Die luftförmigen Körper werden auch Gase genannt. Wie die flüssigen Körper besitzen die luftförmigen auch die leichte Verschiebbarkeit der Teilchen und die Fortpflanzung des Druckes nach allen Richtungen; dashalb haben sie auch alle entsprechenden Eigenschaften der flüssigen Körper, insbesondere bringen sie auch einen Boden- und Seitendruck, sowie einen Auftrieb hervor.

Das Gewicht luftförmiger Körper findet man auf folgende Weise. Man nimmt einen Glasballon, dessen Hals mit einer Messingfassung versehen ist und durch einen Hahn verschlossen werden kann. Man wägt den Ballon zuerst so, wie er ist, also mit Luft gefüllt; man entfernt nun die Luft aus ihm, was, wie später gezeigt wird, mittels der Luftpumpe geschieht, und wägt ihn wieder; er wiegt

dann weniger, der Unterschied ergibt das Gewicht der in ihm enthaltenen Luft. Man füllt ihn nun mit Wasser, wägt ihn, und erhält so das Gewicht des Wassers; daraus ergibt sich das sp. G. der Luft = 0,00129. Ein Liter Luft wiegt demnach 0,00129 *kg* = 1,29 *g*, was wenig zu sein scheint; 1 *cbm* Luft wiegt aber 1,29 *kg*, und die Luft in einem geräumigen Zimmer wiegt schon einige Zentner. Es ist deshalb das Gewicht der Luft, obwohl sie 773 mal leichter ist als Wasser, nicht als etwas Geringfügiges anzusehen.

34. Luftdruck.

Unsere Erde ist rings umgeben mit einer Luftschichte, die man die Atmosphäre nennt. Da die Luft schwer ist, wird sie von der Erde angezogen und übt deshalb auf die Oberfläche der Erde und auf alle dort befindlichen Gegenstände nach den Gesetzen des Bodendruckes einen Druck aus, den man den Luftdruck nennt. Wir fühlen den Luftdruck nicht, und es war auch lange Zeit sein Vorhandensein den Menschen unbekannt, bis Torricelli, ein Schüler Galileis, denselben (1643) durch folgenden Versuch, den Torricellischen Versuch, nachwies.


Fig. 47.

Man nimmt eine etwa 80 *cm* lange am einen Ende verschlossene Glasröhre, füllt sie ganz mit Quecksilber, verschließt das offene Ende mit dem Finger, kehrt die Röhre um und stellt sie so in ein Schälchen (Wanne) mit Quecksilber; ist das Ende der Röhre unter dem Quecksilber des Schälchens, so entfernt man den Finger und hält die Röhre vertikal. Man sollte meinen, das Quecksilber würde aus der Röhre nun herauslaufen, bis es nach dem Gesetz der kommunizierenden Röhren in der Röhre eben so hoch steht als im Schälchen; man findet aber, daß es wohl etwas in der Röhre heruntersinkt, aber doch in der Röhre um ca. 76 *cm* höher steigt und stehen bleibt als im Schälchen. Man schließt, daß eine Kraft vorhanden sein muß, welche das Quecksilber so hoch hinaufdrückt, und erkennt, daß es der Druck der Luft ist, welcher auf das Quecksilber im Schälchen drückt, sich in der Flüssigkeit nach allen Seiten fortpflanzt und so das Quecksilber 76 *cm* hoch in der Röhre hinaufdrückt. Der Raum in der Röhre über dem Quecksilber ist luftleer, wird deshalb ein Vakuum und nach seinem Erfinder das Torricelli'sche Vakuum genannt; es ist ein kraftloser Raum. **Der äußere Luftdruck hebt das Quecksilber 76 *cm* hoch.**

Weil der Luftdruck das Quecksilber 76 *cm* hoch heben kann, also dem Druck einer Quecksilbersäule von 76 *cm* Höhe das Gleichgewicht halten kann, so kann man die Größe des Luftdruckes be-

rechnen, wenn man den Druck dieser Quecksilbersäule etwa auf 1 *qcm* berechnet. Da dieses Gewicht $1 \cdot 76 \cdot 13{,}596 = 1033$ *g* ist, so **beträgt der Luftdruck ca. 1 *kg* auf jedes *qcm*.** Dies scheint ziemlich gering zu sein, da aber auf einen *qdm* ca. 100 *kg*, auf 1 *qm* ca. 10 000 *kg* treffen, so erkennt man, daß der Luftdruck eine beträchtliche Größe hat. Das Gewicht der ganzen Luftmasse der Erde ist nahezu = 80 000 Billionen Zentner.

Füllt man beim Torricellischen Versuch die Röhre mit einer andern Flüssigkeit, etwa mit Wasser, so wird dasselbe, da es viel (13,5) mal leichter ist als das Quecksilber, viel höher gehoben; in kurzen Röhren bleibt es also ganz oben stehen, erst bei ca. 10 *m* Länge sinkt das Wasser. **Der Luftdruck kann das Wasser 10 *m* hoch heben.** Schon Galilei gab an, daß das Wasser in einer solchen Röhre bloß 18 Florentiner Ellen hoch stehen könne; Torricelli erklärt dies als Folge des Luftdruckes und veranlaßte Viviani, den Versuch mit Quecksilber zu machen.

Da der Bodendruck der Luft gleich dem Gewicht einer Wassersäule von 10 *m* ist, so müßte die Luft, um vermöge ihres geringen Gewichtes (773 mal leichter als Wasser) einen solchen Druck hervorbringen zu können, eine Höhe von 7730 *m* haben, vorausgesetzt, daß sie nach oben hin immer gleich dicht bleibt. Da aber die Luft nach oben hin immer dünner wird, so ist die Höhe der Lufthülle oder Atmosphäre viel beträchtlicher. Man kann zwar nicht angeben, wie hoch sie wirklich ist, weiß aber, daß sie bei 15 Meilen Höhe schon ca. eine Million mal dünner ist als bei uns, daß demnach die noch höher liegende Luftmasse sicher von sehr geringer Bedeutung ist.

Als flüssiger Körper übt die Luft auch einen Seitendruck aus, d. h. die Luft drückt nach allen Seiten eben so stark wie auf den Boden. Daher kommt es, daß wir den Luftdruck nicht als eine auf uns liegende Last empfinden; denn der von oben her kommende Druck wird durch den von unten her kommenden Seitendruck (Auftrieb) aufgehoben.

Man nennt den Druck der Luft auch den Druck der oder einer Atmosphäre, nimmt ihn normal gleich dem Druck einer Quecksilbersäule von 76 *cm* Höhe, also 1,033 *kg* auf 1 *qcm*, also auch gleich dem Druck einer Wassersäule von 10,33 *m* Höhe an. Man vergleicht auch andere Drucke messend mit dem Luftdruck, sagt also, der Bodendruck des Wassers beträgt bei 30 *m* Tiefe 3 Atmosphären (*ca*), oder der Druck des Dampfes in einem Dampfkessel beträgt 5 Atm., wenn nämlich der Dampf auf jedes *qcm* mit einer Kraft von $5 \cdot 1{,}033$ *kg* drückt.

35. Barometer.

Zur Messung des Luftdruckes dienen die Barometer, die im wesentlichen Torricelli'sche Röhren sind.

1) Das Normalbarometer oder Gefäßbarometer. Es besteht aus einer Torricelli'schen Röhre, die in einem Glasschälchen mit Quecksilber besteht. Die Röhre muß vollständig luftleer sein; man erreicht dies, wenn man die mit Quecksilber gefüllte Röhre, bevor man sie umkehrt, zuerst auskocht, d. h. so lange erhitzt, bis das Quecksilber ins Kochen kommt; es bilden sich dann Quecksilberdämpfe, welche die noch in der Röhre enthaltenen insbesondere an den Wänden anhängenden Luftteilchen mit hinausreißen. Ob es gut luftleer ist, erkennt man am fertigen Barometer, wenn man die Röhre rasch neigt, so daß das Quecksilber oben am Glase anschlägt; es muß sich dabei ein heller, klarer Schlag zeigen, so wie wenn Metall auf Glas geschlagen wird. Das Quecksilber muß ganz rein (chemisch rein) sein: gewöhnliches Quecksilber enthält meist Blei, Silber und andere Metalle aufgelöst, hat deshalb ein geringeres sp. G. und würde somit höher stehen, als es sollte. Die Röhre muß wenigstens oben, wo das Quecksilber aufhört, ziemlich weit sein (etwa 1 *cm*), weil sie sonst wie eine Kapilarröhre wirkt, also eine Kapilardepression hervorbringt, weshalb das Quecksilber tiefer steht als es sollte. Weiter unten darf die Röhre eng sein und wird auch blos 2 *mm* weit genommen.

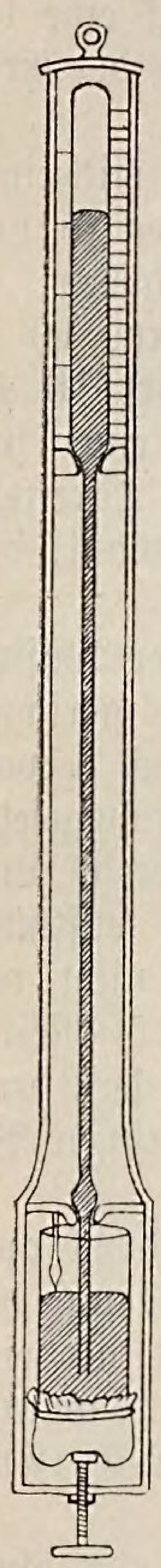


Fig. 48.

Die Röhre muß genau vertikal stehen; das wird erreicht, indem man sie aufhängt, zur Ruhe kommen läßt und dann in dieser Lage festklemmt. Die Skala muß stets an der Oberfläche des Quecksilbers im Schälchen anfangen. Wenn nämlich der Luftdruck größer wird, so steigt das Quecksilber in der Röhre, es tritt Quecksilber aus dem Schälchen in die Röhre, folglich sinkt es im Schälchen und umgekehrt, wenn der Barometer fällt. Man muß also entweder die Skala verschiebbar machen, so daß ihr Anfang auf das Niveau des Quecksilbers im Schälchen eingestellt werden kann, oder man macht den Boden des Schälchens aus einem Lederbeutel, bringt unter demselben eine Schraube an, durch welche man das Quecksilber im Schälchen stets so hoch stellen kann, daß es den Anfang der Skala berührt. So eingerichtete Barometer nennt man Normalbarometer, weil sie von allen Fehlern befreit, den Luftdruck richtig angeben und ihn zu messen ermöglichen.

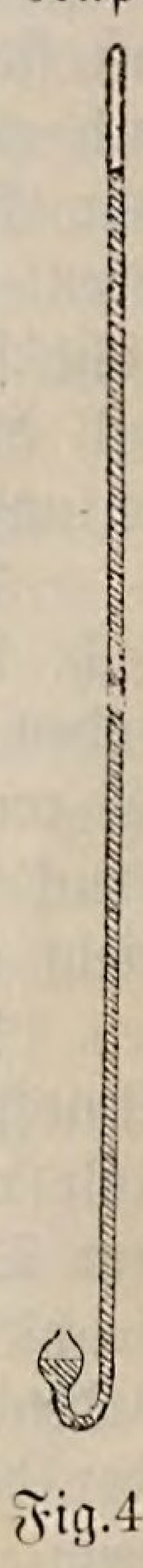
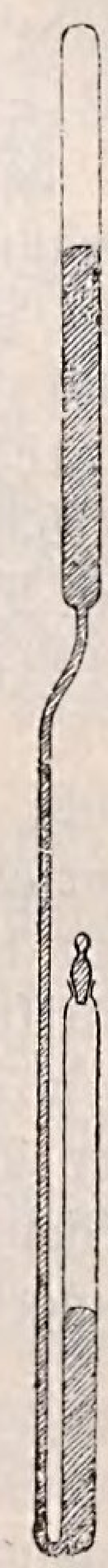


Fig. 49.

2) Das Birn- oder Phiolenbarometer. Die Torri-

celli'sche Röhre biegt sich unten um, führt etwas nach aufwärts und endigt in einem birn- oder phiolenförmigen, oben offenen Gefäße. Dasselbe vertritt die Stelle des Schälchens beim Normalbarometer; auf das in ihm befindliche Quecksilber drückt die Luft und hebt dadurch das Quecksilber in der Torricelli'schen, oben luftleeren Röhre. Da die Röhre gewöhnlich ziemlich eng genommen wird, das Niveau des Quecksilbers in der Birne sich verändert, und sie häufig auch schlecht ausgekocht sind, so sind die Angaben dieser Barometer sehr ungenau; doch kann man an ihnen mit genügender Genauigkeit ablesen, um wie viel der Barometerstand etwa im Laufe eines Tages sich verändert hat. Solche Birnbarometer sind die gewöhnlichen käuflichen Barometer und waren die ersten Barometer, die zuerst von der Akademie in Florenz seit 1657 angefertigt wurden.

3) Das Heber-Barometer (v. Boyle 1694, von Fortin als Reisebar. eingerichtet). Die Torricelli'sche Röhre biegt sich unten um und geht noch etwa 30 *cm* weit nach aufwärts; dieses Ende ist verschlossen durch einen eingetriebenen Glasstöpsel; zwischen ihm und der Röhre ist wegen der Rauhigkeit desselben hinreichend Platz, um die Luft durchgehen zu lassen, jedoch sind diese Kanälchen viel zu klein, als daß Quecksilber herauslaufen könnte. Der obere Teil der Torricelli'schen Röhre und der untere nach aufwärts gehende Schenkel müssen genau gleich weit sein; der übrige Teil kann beliebig weit gewählt werden und ist meist eng. Drückt die Luft auf das Quecksilber im untern Schenkel, so steigt es in der Torricelli'schen Röhre in die Höhe und steht also dort ca. 76 *cm* höher als im untern Schenkel. Wird der Luftdruck stärker, etwa um 1 *cm*, so sinkt es im unteren Schenkel um $1/2$ *cm* und steigt in der Röhre um $1/2$ *cm*. Die Skala ist infolge dessen in halbe *cm* geteilt und fest; macht man sie verschiebbar, so wird sie immer auf das untere Niveau eingestellt, und ist dann in ganze *cm* eingeteilt. Dieses Barometer kann auch auf Reisen mitgenommen werden, befindet sich dann in einem Etui, wird, wenn es transportiert werden soll, zunächst geneigt, bis der lange Schenkel voll Quecksilber ist, dann nach ganz umgekehrt, so daß das wenige, noch im kurzen Schenkel befindliche Quecksilber gegen den Glasstöpsel hinfließt, bei dem es nicht herauslaufen kann. In dieser Lage kann es dann transportiert werden, weil das Quecksilber in der Röhre nicht mehr schwankt, und so das Barometer nicht mehr in Unordnung kommt.


Fig. 50.

4) Das Metallbarometer, auch Aneroid- oder Holosterik-Barometer genannt, hat eine wesentlich andere Einrichtung. Es besteht aus einer runden Blechdose (desh. Dosenbarometer gen.), deren Deckel aus sehr gut elastischem, ringförmig ge-

wellter Blech besteht. Die Dose ist vollständig verschlossen*) und luftleer. Die Luft drückt auf den elastischen Deckel und drückt ihn nach einwärts, und zwar um so weiter, je größer der Luftdruck ist; wird der Luftdruck geringer, so geht das Blech durch seine Elastizität wieder entsprechend nach auswärts. Um diese ungemein kleine, mit bloßem Auge nicht sichtbare Bewegung messen zu können, wird sie zuerst auf folgende Art größer gemacht. Auf der Mitte des gewellten Bleches ist ein Stift angebracht, welcher gegen einen einarmigen Hebel drückt, und zwar sehr nahe an seinem Stützpunkte, also an einem sehr kurzen Hebelarme; deshalb macht das Ende des Hebels schon eine viel größere Bewegung. Dieses Ende drückt mittels einer Stange auf einen zweiten Hebel, einen Winkelhebel, und zwar auf das Ende des kurzen Hebelarmes, so daß das Ende des langen Hebelarmes eine noch viel größere Bewegung macht. An diesem Ende ist ein Kettchen befestigt, das mit seinem andern Ende um einen drehbaren Stift gewickelt ist, und auf diesen Stift ist ein Zeiger aufgesteckt, der über einem geteilten Kreise spielt. Dieses Zeigerende macht demnach eine verhältnismäßig große, deutlich sichtbare Bewegung, durch welche man den Barometerstand ablesen kann, wenn die Kreisteilung durch Vergleich mit dem Normalbarometer hergestellt ist.

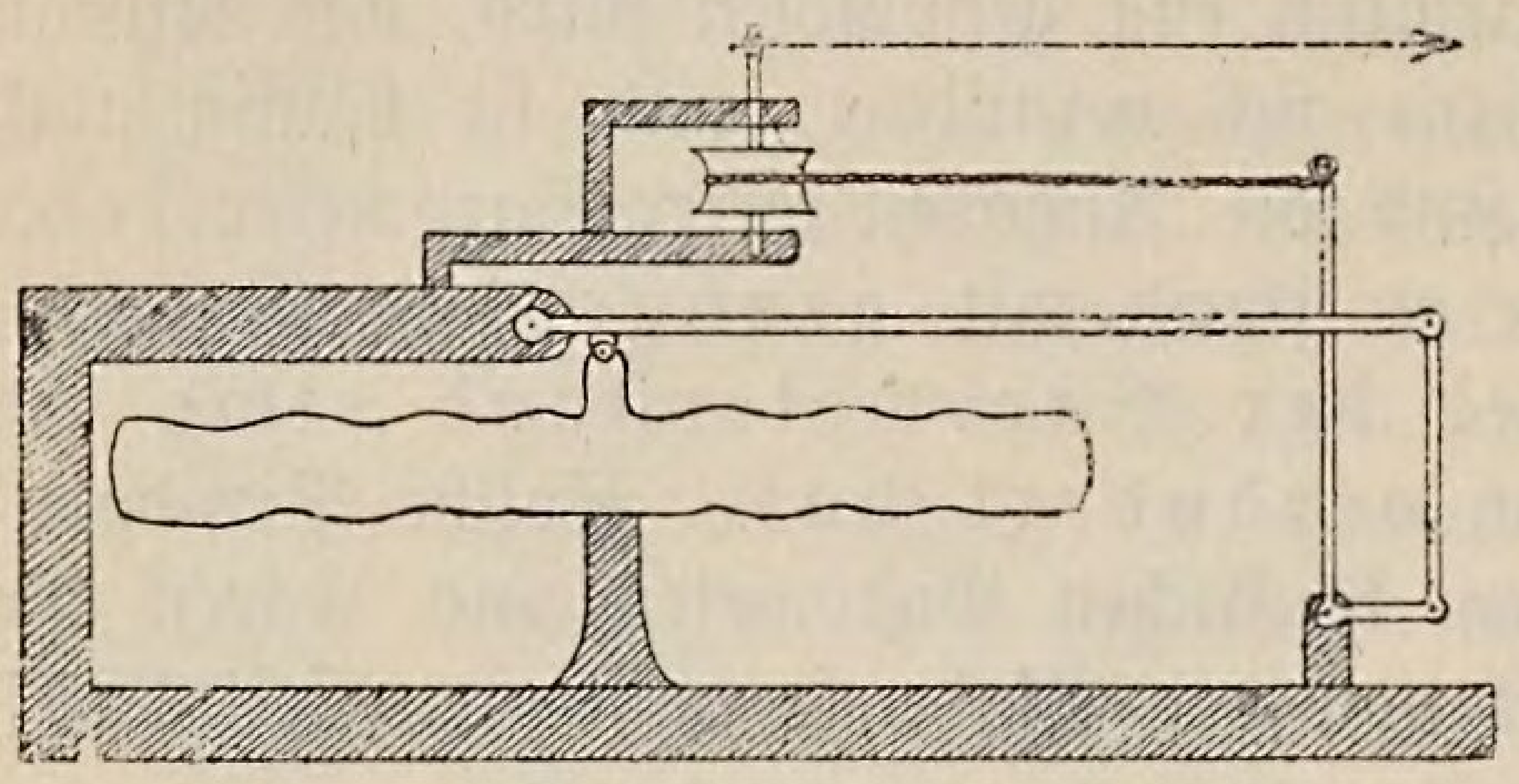


Fig. 51.

Die Aneroidbarometer sind nicht leicht zerbrechlich, kommen nicht in Unordnung, sind, in einem Etui verschlossen, leicht transportabel und eignen sich deshalb für Reisebarometer und für den häuslichen Gebrauch sehr gut. Man kann jedoch mit ihnen den wirklichen Barometerstand nicht genau angeben; denn sie haben meist ziemliche Ungenauigkeit in der Konstruktion, sind zudem stark von der Temperatur abhängig und folgen auch nicht ganz genau den Schwankungen des Barometers; jedoch geben sie die täglichen Schwankungen des Luftdruckes mit meist hinreichender Genauigkeit an.

36. Anwendung des Barometers.

1) Barometrische Höhenmessungen. Trägt man das Barometer auf einen Berg, so findet man, daß es sinkt, um so tiefer, je höher man steigt; denn das Barometer gibt nur den Druck der über ihm befindlichen Luftsäule an; da diese auf dem Berge geringer

*) Ein Gefäß, daß so vollständig verschlossen ist, daß die Luft nicht eindringen kann, nennt man auch hermetisch verschlossen.

ist als im Thale, **so steht das Barometer auf dem Berge niedriger als im Thale.** Den ersten Versuch dieser Art machte Perier auf Anregung Pascals auf dem Puy-de-Dôme 1648. Die Akademie in Florenz wiederholte den Versuch und fand schon bei ca. 28 *m* Höhe einen Unterschied. Nur auf dem Meeresspiegel steht das Barometer 76 *cm* hoch. Steigt man 10 *m*, so sinkt das Barometer um ca. 1 *mm*, bei 20 *m* um ca. 2 *mm*; das geht jedoch nicht so einfach fort; denn wenn man höher hinaufkommt, so wird die Luft dünner, infolgedessen leichter, und man muß dann um mehr als 10 *m* steigen, wenn das Barometer wieder um 1 *mm* sinken soll. Man hat nun berechnet, wie hoch das Barometer bei den verschiedenen Höhen über dem Meere stehen muß, und findet dies in den hypsometrischen Tabellen. Kennt man somit den mittleren Barometerstand eines Ortes, so kann man mit großer Genauigkeit dessen Meereshöhe angeben. Um den mittleren Barometerstand eines Ortes zu finden, genügt es nicht, das Barometer einmal zu beobachten, weil es vielen Schwankungen unterworfen ist, sondern man muß es Jahre lang täglich zu verschiedenen Stunden beobachten und aus allen Beobachtungen das Mittel nehmen; das ist dann der mittlere Barometerstand.

Will man die Höhe eines Berges messen, so muß man zuerst die Höhe des Fußes bestimmen, dann möglichst zu derselben Zeit den Unterschied der Barometerstände am Fuß und am Gipfel bestimmen und hieraus mittels der hypsometrischen Tafel die Höhe des Berges berechnen; sie ergibt sich jedoch etwas ungenau. Wenn keine große Genauigkeit erforderlich ist, so ist diese Art der Höhenmessung wegen ihrer Einfachheit sehr bequem. Die erste Tabelle für barometrische Höhenmessung stellte Halley her, † 1724.

2) Das Barometer in der Witterungskunde (Meteorologie). Wenn man täglich das Barometer beobachtet, so findet man ein unregelmäßiges Fallen und Steigen (sogleich von Torricelli beobachtet). Man fand, daß der Barometerstand mit der Witterung zusammenhänge, daß bei tiefem Barometerstand westliche Winde uns Wolken und Regen oder Schnee, im Sommer Kälte, im Winter Wärme bringen, daß insbesondere auf rasches und tiefes Fallen des Barometers oft stürmisches Wetter eintritt; bei hohem Barometerstand dagegen herrschen leichte bis mäßige östliche Winde, geringe Bewölkung und im Sommer große Hitze, im Winter strenge Kälte. Wegen dieses Zusammenhanges benützte man das Barometer zur Vorherbestimmung des Wetters und nannte es auch Wetterglas*).

---

*) Es mag hier erwähnt werden, daß Guericke schon vor Torricelli ein Barometer erfunden hatte; es war ein Wasserbarometer, also eine ca. 10 *m* lange mit Wasser gefüllte Röhre; erst auf dem Reichstage zu Regensburg 1654 erhielt er Kunde von Torricellis Entdeckung. Dies Wasserbarometer benützte er schon als Wetterglas und prophezeite einen Sturm (1660).

Die Wetterprophezeihungen (Prognosen) zeigten sich aber als sehr unzuverlässig.

Man hat jedoch andere mit dem Luftdrucke zusammenhängende Gesetze erkannt, die ebenso sicher, als für die Wetterprognosen wichtig sind. Sie sind: 1) das Gesetz der barometrischen Minima

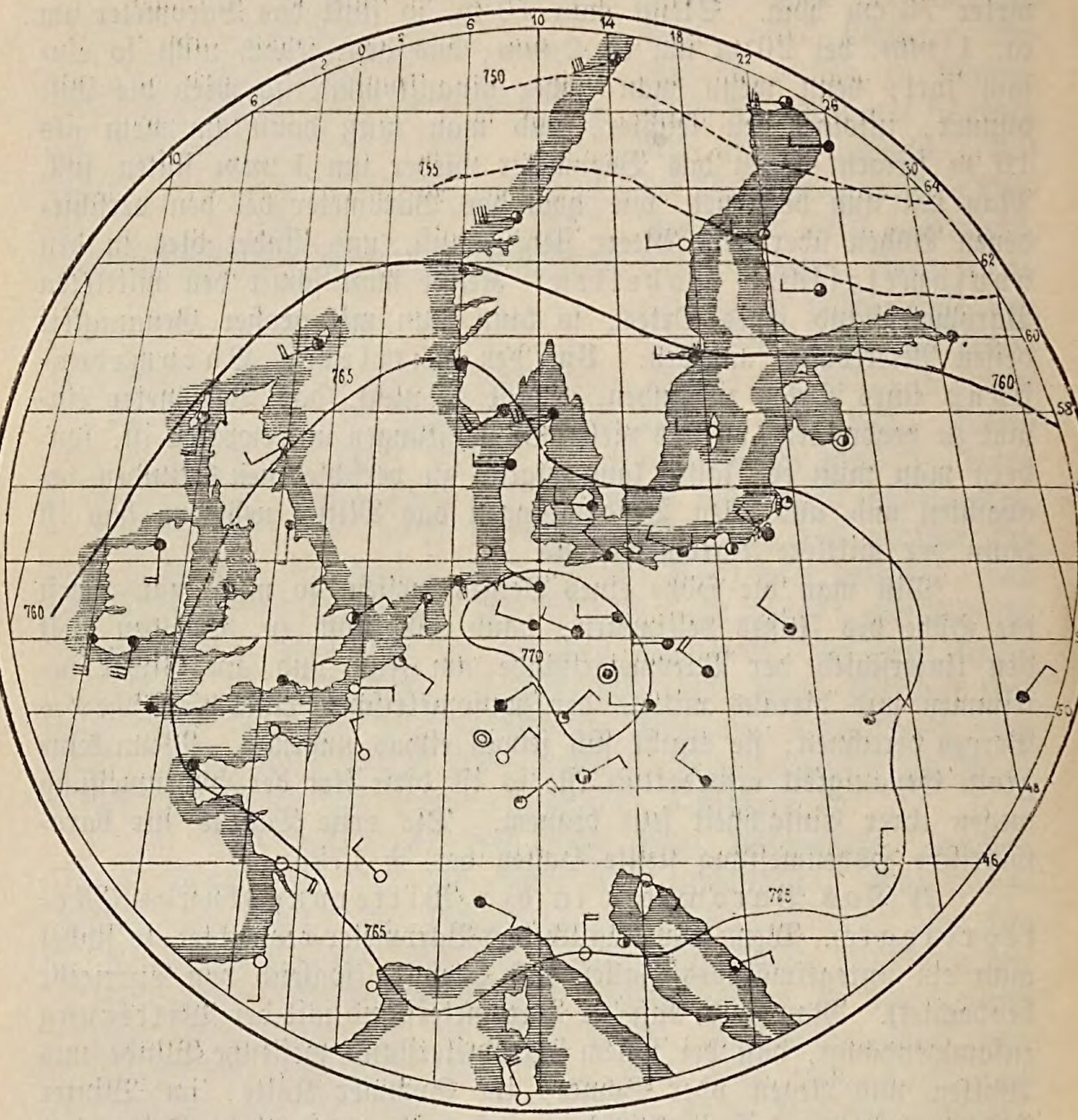


Fig. 52.

und Maxima. Wenn man an vielen Orten Europas täglich zu gleicher Zeit (etwa 8 Uhr morgens) den Barometerstand beobachtet*),

Andererseits hatte die Akademie von Florenz keine Kenntnis von Guerickes Luftpumpe und untersuchte doch schon das Verhalten verschiedener Körper und Erscheinungen im luftleeren Raum, indem sie Torricellische Vakua von großem Volumen herstellte. Auch Paskal erforschte 1646 die Gesetze des Luftdruckes durch barometrische Versuche.

*) Diese Barometerstände müssen zuerst auf das Meeresniveau reduziert werden, d. h. man muß berechnen, wie hoch das Barometer an diesem Orte stehen müßte, wenn der Ort auf dem Meeresniveau läge. Z. B. zu 740,6 *mm* müssen bei 220 *m* Lokalhöhe 21,6 *mm* addiert werden.

diese Beobachtungen sammelt und vergleicht, indem man etwa sämtliche zu derselben Stunde gemachte Beobachtungen auf eine Landkarte einträgt (*synoptische* Karte), so findet sich stets eine gesetzmäßige Verteilung des Barometerstandes. Ein Punkt hat den tiefsten Barometerstand, man nennt ihn das *barometrische Minimum*; von diesem Punkte nach *allen* Richtungen auswärts steigt das Baro-

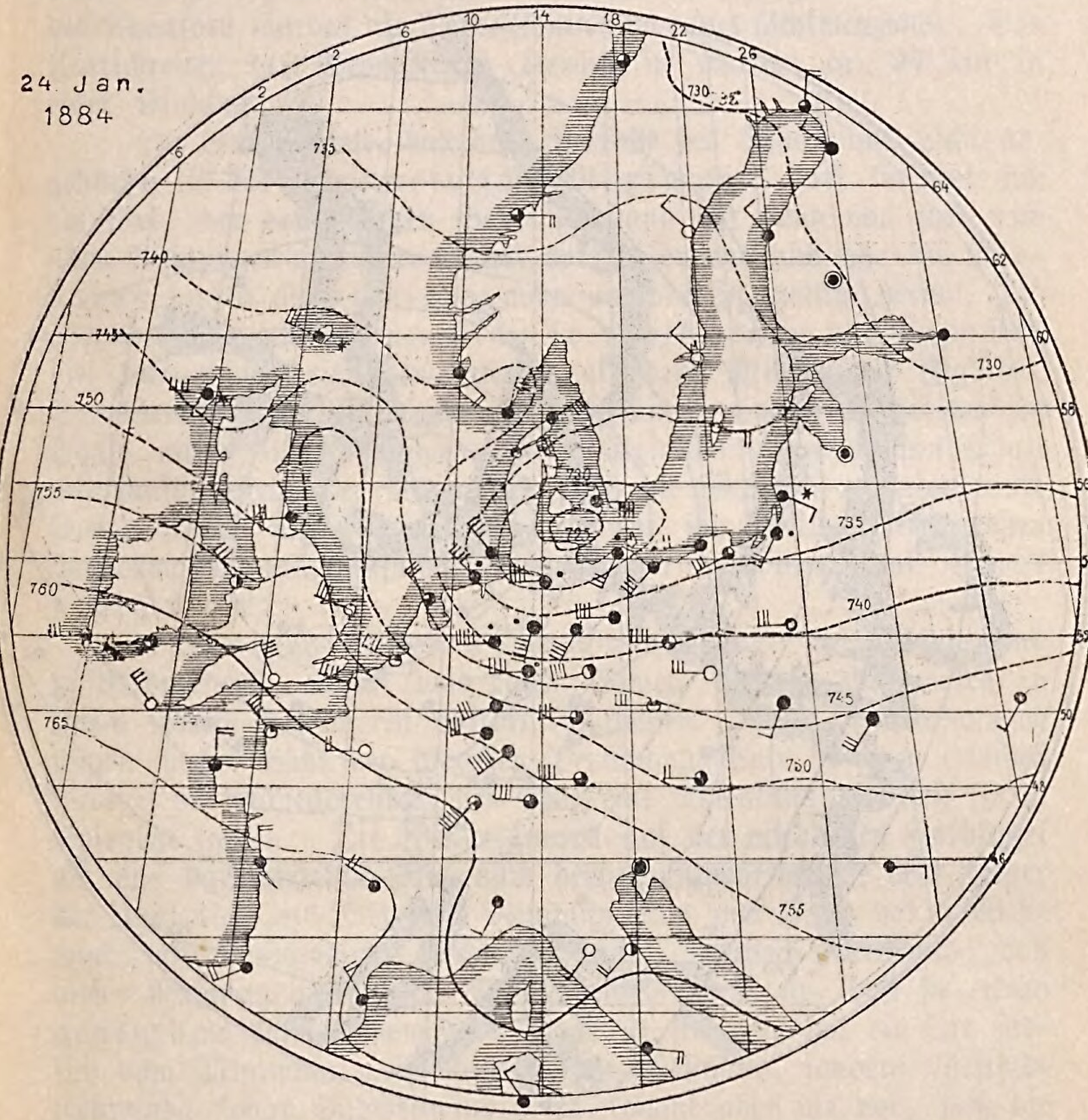


Fig. 53.

meter, und zwar ziemlich gleichmäßig; verbindet man alle diejenigen Punkte, die gleich hohen Barometerstand haben, z. B. alle von 730, 735, 740 ꝛc. . . . *mm* (man nennt diese Verbindunglinien *Isobaren*), so haben diese Linien eine *nahezu kreisförmige* Gestalt und umgeben in immer größeren Ringen das barometrische Minimum. Den ganzen Bereich, den diese zum Minimum gehörigen Isobaren einschließen, nennt man eine *barometrische Depression*. (Fig. 53. 54.)

Der tiefste Barometerstand bei einer solchen Depression, also das barometrische Minimum, beträgt in Europa meistens an 730 *mm*, hie und da bis 710 *mm*, geht in der heißen Zone jedoch bis 700 *mm* herunter. Vergleicht man Länge und Tiefe der barometrischen Depressionen von Tag zu Tag, so zeigt sich folgende Gesetzmäßigkeit: Dieselben rücken bei uns in der Hauptrichtung von

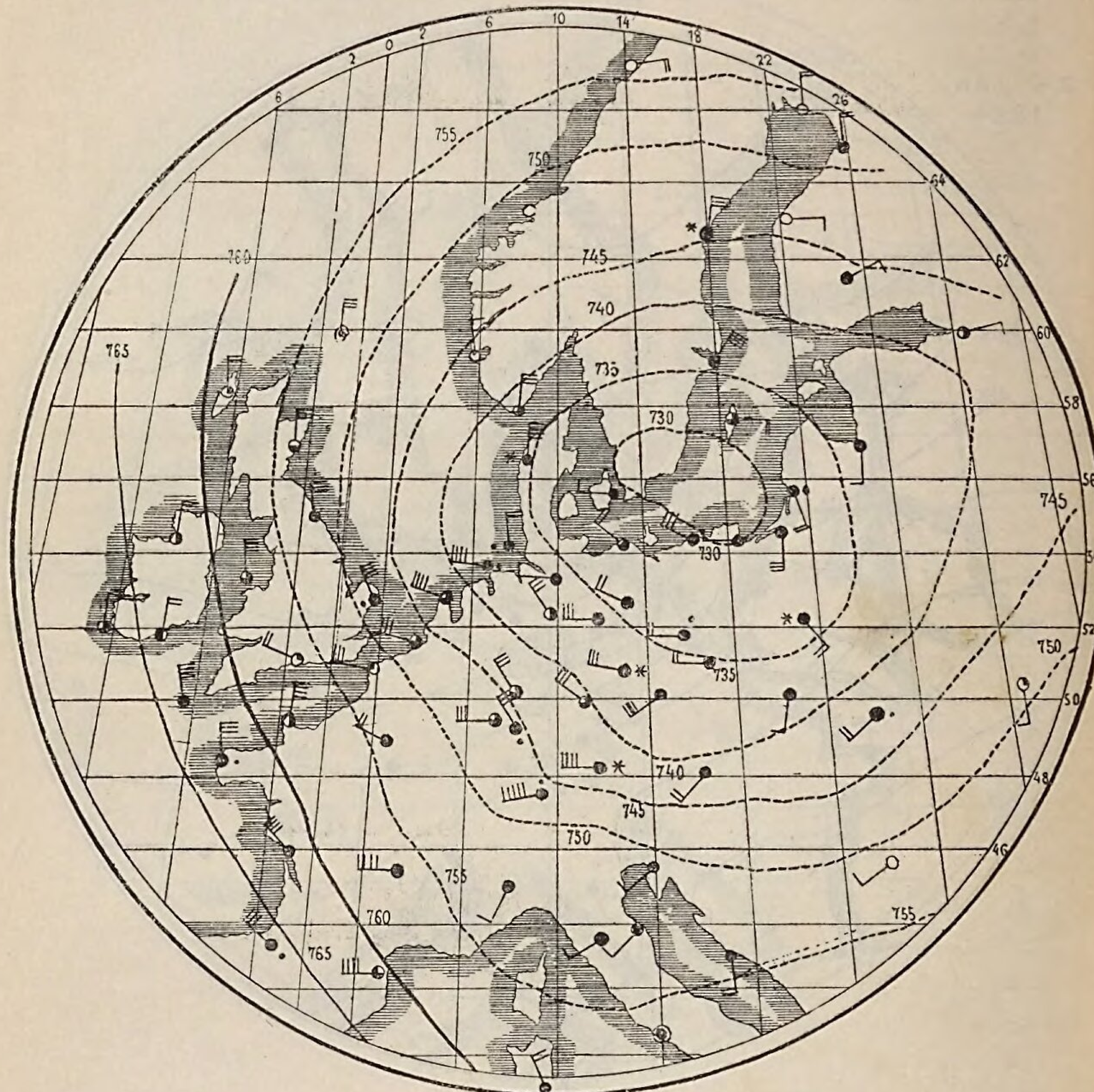


Fig. 54.

West nach Ost vor, sie kommen vom atlantischen Ozean, ziehen über England, die Nordsee, Dänemark, die Ostsee nach Rußland, oder sie dringen von den Faröerinseln gegen Norwegen und über Schweden und Rußland, oder sie ziehen zwischen Island und Norwegen ins nördliche Eismeer und streifen bloß Europa. Auf diesen Wegen sind sie am tiefsten. Einige dringen in Frankreich ein und durchziehen Europa, andere dringen über Dänemark nach Deutschland ein, manche durchstreifen das Mittelmeer, kommen

wohl auch vom nordadriatischen Meer nach Österreich; alle ins Innere des Kontinentes eindringenden Depressionen verlieren meist rasch an Tiefe, verflachen sich, füllen sich aus und verschwinden. Auf der nördlichen Halbkugel schreiten die Depressionen in den Tropen in der Richtung nach *WNW*, außer den Tropen nach *ENE* fort; auf der südlichen Halbkugel hat man *S* statt *N* zu setzen. Innerhalb 6 Breitengraden zu beiden Seiten des Äquators wurden nie Depressionen beobachtet (Kalmenzone). Das Fortschreiten der Depressionen beträgt in Europa ca. 27 *km* in einer Stunde.

In dem Gebiete, das dem Bereiche des Minimums nicht angehört, ist das barometrische Maximum: dort befindet sich ein Ort, der den höchsten Barometerstand hat, und von ihm nach allen Richtungen auswärts nimmt der Barometerstand ab: die Isobaren laufen auch kreisförmig um das Maximum herum, sind aber der Form nach lange nicht so regelmäßig und liegen stets viel weiter von einander entfernt als beim Minimum. Fig. 52. Der Bereich des Minimums ist vergleichbar einem trichterförmigen Thale mit steilen Abhängen, das Maximum einem flachen Hügel mit sanft ansteigenden Rändern. Auch die Maxima verändern ihre Lage, jedoch unregelmäßig, bilden sich meist über großen Ländermassen aus (Rußland, Mitteleuropa) und bleiben oft lange ruhig stehen.

2) Das Windgesetz (von Buijs Ballot): Alle Winde sind Luftströmungen, welche von einem Gebiete höheren Luftdruckes zu einem solchen niedrigeren Luftdruckes fließen. Diese Luftströmungen folgen hiebei nicht der kürzesten Verbindungslinie, sondern erleiden infolge der Achsendrehung der Erde eine Ablenkung, so daß sie in Spiralen laufen. **Die Winde laufen auf der nördlichen Halbkugel um das barometrische Minimum herum entgegengesetzt dem Zeiger der Uhr;** liegt ein Ort vom Minimum aus südlich, so hat er Westwind, östlich Südwind, nördlich Ostwind, westlich Nordwind; von dieser Richtung weichen die Winde jedoch derart ab, daß sie etwas gegen das Minimum zugewendet sind; so hat ein Ort südlich vom Minimum meist nicht reinen Westwind, sondern Westsüdwestwind, sogar Südwestwind. Es kommt aber nie vor, daß die Windrichtung von dieser Hauptrichtung ganz abweicht; der Wind läuft nie in entgegengesetzter Richtung um das Minimum und nie vom Minimum weg. Auf der südlichen Halbkugel läuft der Wind in entgegengesetzter Richtung um das Minimum, also gerade wie die Zeiger der Uhr, aber auch dem Minimum zugewendet.

Jede solche wirbelförmige Luftbewegung nennt man einen Cyklon. Auch um das Maximum laufen die Winde, aber gerade umgekehrt, also bei uns wie der Zeiger

der Uhr, und sind dabei etwas vom Maximum abgewendet (Anticyklon); doch sind diese Richtungen im allgemeinen größeren Abweichungen ausgesetzt als beim Minimum.

Die Windstärke hängt mit der Nähe der Isobaren zusammen; je näher die Isobaren an einander liegen, desto stärker ist der Wind, und gerade dort, wo sie am nächsten bei einander liegen, ist der Wind am stärksten. Stürmische Winde, volle Stürme und Orkane kommen nur im Bereich der barometrischen Depressionen vor (ausgenommen rasch vorübergehende Gewitterstürme), und zwar sind sie um so stärker, je tiefer das Minimum ist; deshalb kommen Orkane fast nur in der heißen Zone vor. Da beim Maximum die Isobaren stets verhältnismäßig weit aus einander liegen, so sind die in seinem Bereiche auftretenden Winde meist schwach, höchstens an den Rändern stark, nie stürmisch.

3) Einfluß auf das Wetter. Wenn ein barometrisches Minimum vom Meere her ins Land eindringt, so führt der Wind eine Menge Luft vom Meere herein, die feucht ist und deshalb viel Regen bringt; diese Luft ist im Sommer kälter und im Winter wärmer als das Land. Da in bezug auf Deutschland die meisten Depressionen nördlich vorüberziehen, so erhalten wir durch sie südwestliche, dann westliche Winde mit Bewölkung und Regen. Im Bereich des Maximums, insbesondere wenn es über einer großen Ländermasse steht, herrschen schwache bis mäßige Winde, bei uns meist östlicher Richtung, heiterer Himmel und Trockenheit, im Sommer infolge des Sonnenscheines große Hitze, im Frühjahre und Herbst in den hellen Nächten oft Frost, im Winter in den langen, hellen Nächten große Kälte, die durch den kurzen täglichen Sonnenschein nicht beseitigt werden kann.

4) Die Wetterprognosen. Wenn an vielen Orten zu gleicher Zeit täglich Barometer, Thermometer, Windrichtung und -Stärke, Bewölkung, Regen oder Schnee beobachtet werden, und diese Beobachtungen sofort alle an einen Ort (meteorologische Zentralstation) telegraphiert werden, so ist man dort im stande, die Witterungslage, die zu dieser Zeit herrschte, zu überblicken, und auf Grund der angegebenen Gesetze das künftige Wetter vorherzusagen (prognostizieren) und zwar mit ziemlich großer Sicherheit, wenn man das Wetter bloß für den nächsten Tag und für einen ziemlich kleinen Bezirk (etwa von der Größe einer Provinz) bestimmt. Diese Prognosen werden dann täglich sofort auch bekannt gegeben und sind für den Gärtner, Land- und Forstmann von größtem Nutzen. Insbesondere wirken auch die Sturmwarnungen sehr segensreich. Es werden nämlich die Küstenorte der deutschen Nord- und Ostsee von der „Seewarte in Hamburg" rechtzeitig vom Herannahen eines Sturmes in Kenntnis gesetzt, so daß Küstenfahrer und Fischer den Gefahren des Sturmes noch entgehen können.

Ähnliche meteorologische Zentralstellen für Wetterprognosen und Sturmwarnungen sind nun schon in allen zivilisierten Staaten eingerichtet.

37. Ausdehnungsbestreben der Luft.

Die luftförmigen Körper haben die Eigenschaft der leichten Verschiebbarkeit der Teilchen und der gleichmäßigen Fortpflanzung des Druckes mit den flüssigen Körpern gemein. Sie unterscheiden sich von ihnen wesentlich durch eine weitere Eigenschaft, nämlich die sehr beträchtliche Zusammendrückbarkeit und ein unbegrenztes Ausdehnungsbestreben. Beide Eigenschaften faßt man auch durch den Ausdruck Elastizität zusammen und nennt die luftförmigen Körper auch elastisch-flüssige Körper, obwohl der Ausdruck Elastizität, wie wir sehen werden, für luftförmige Körper nur in etwas anderem Sinne paßt als für feste Körper.

Luftförmige Körper haben ein unbegrenztes Ausdehnungsbestreben, d. h. ein luftförmiger Körper sucht sich so weit als möglich auszudehnen; er nimmt also den Raum, der ihm geboten wird, stets vollständig ein. Bringt man 1 *l* gewöhnliche Luft in einen 1 *cbm* großen und luftleeren Raum, so dehnt sie sich auf den Raum von 1 *cbm* aus und füllt ihn so vollständig aus, daß in demselben nirgends eine Stelle ist, wo sie nicht wäre. Nimmt man aus einem Gefäße, das 1 *l* Luft enthält, $1/2$ *l* Luft heraus, so füllt der darin bleibende $1/2$ *l* dadurch, daß er sich ausdehnt, den ganzen Raum von 1 *l* aus; es ist also in dem Gefäße wieder 1 *l* Luft, die natürlich jetzt dünner ist als zuerst. Ebenso kann man in ein Gefäß von etwa 1 *l* Inhalt zu der schon vorhandenen Luft noch 1 *l* hineinpressen; denn die beiden Luftmengen pressen sich zusammen, so daß sie mit einander nur den Raum von 1 *l* einnehmen. **Luftförmige Körper haben keine selbständige Gestalt, und auch kein selbständiges Volumen; sie richten sich in ihrem Volumen stets nach dem dargebotenen Raume.** Diese Eigenschaft nennt man Ausdehnungs- oder Expansionsbestreben.

38. Luftpumpe.

Die Luftpumpe beruht auf dem Expansionsbestreben der Luft. Sie dient dazu, um die Luft immer mehr aus einem Gefäße zu entfernen, das Gefäß auszupumpen oder zu evakuieren. Sie wurde erfunden von Otto v. Guericke (um 1635), wobei er auch das bis dahin unbekannte Expansionsbestreben der Luft entdeckte.

Die einstiefelige Luftpumpe besteht aus dem Pumpenstiefel, das ist ein genau ausgedrehtes Messingrohr; in ihm befindet sich ein luftdicht anschließender Kolben, der durch einen Handgriff auf und ab bewegt werden kann. Der Stiefel mündet

unten in ein enges Metallrohr, das sich nach aufwärts biegt; an dessen Ende ist ein ganz eben abgeschliffener Glasteller befestigt. Das Ende des Metallrohres ist noch dazu meist mit einem Schraubengewinde versehen, so daß man andere Gefäße anschrauben kann. Auf den Glasteller kann auch eine Glasglocke luftdicht aufgesetzt werden. Ganz nahe am untern Ende des Stiefels befindet sich in der Röhre ein Hahn, der zweifach durchbohrt ist; durch die eine, gerade Bohrung kann der Stiefel mit dem Rezipienten verbunden werden, durch die andere, krumme Bohrung kann entweder der Stiefel

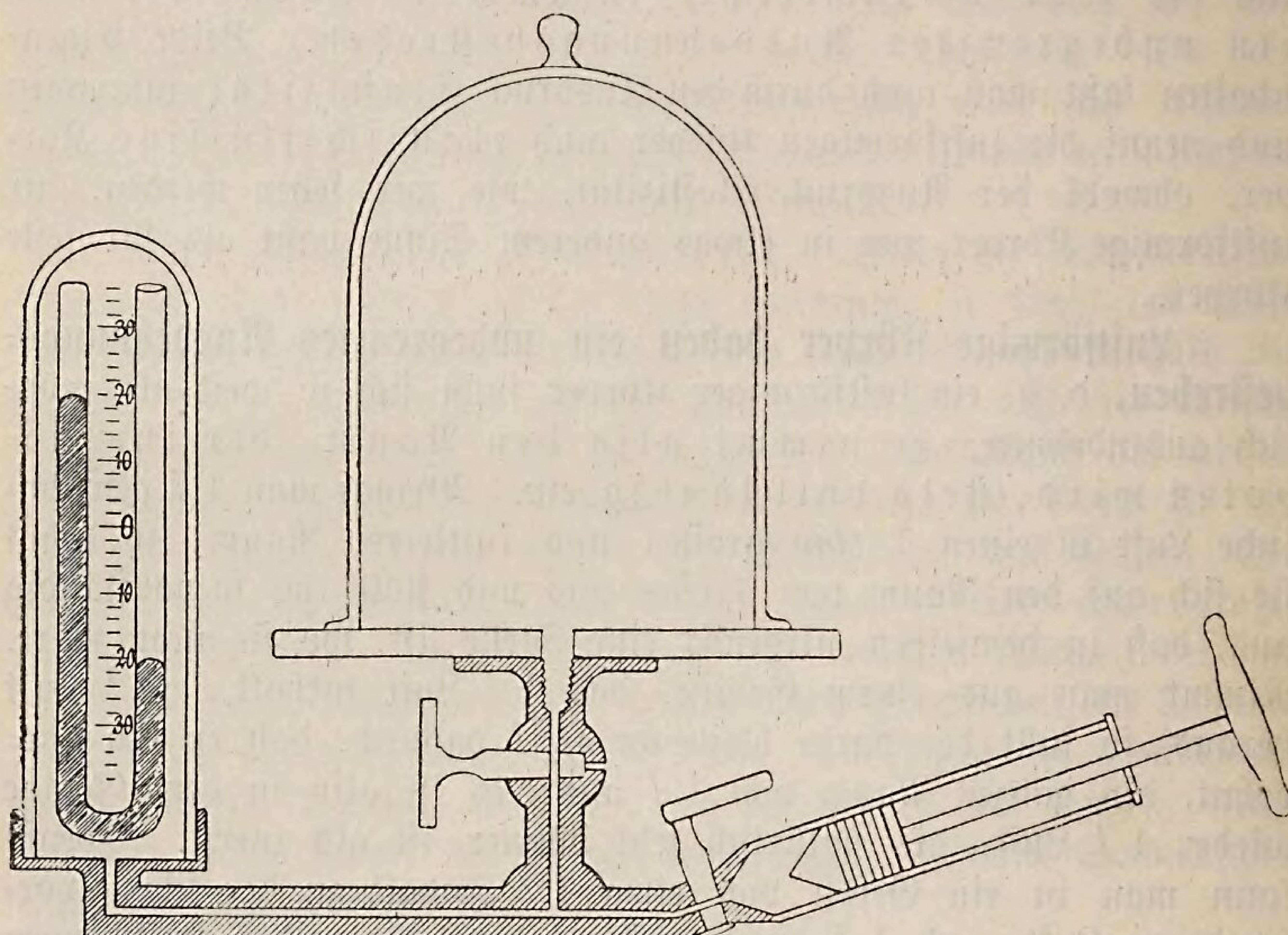


Fig. 55.

oder bei anderer Stellung der Rezipient mit der äußeren Luft verbunden werden.

Um die Luft aus dem Rezipienten zu pumpen stellt man den Hahn so, daß der Stiefel mit dem Rezipienten verbunden ist, und zieht den Kolben in die Höhe; dadurch wird der Luft im Rezipienten auch noch der ganze Raum des Stiefels dargeboten; sie dehnt sich also auch auf diesen Raum aus, indem ein Teil der Luft des Rezienten in den Stiefel hinüberströmt; dadurch ist die Luft im Rezipienten schon dünner geworden. Man stellt nun den Hahn in die zweite Stellung, so daß er den Stiefel mit der freien Luft verbindet, und drückt den Kolben hinunter; dadurch wird die im Stiefel enthaltene Luft hinausgeschafft. Man stellt den Hahn wieder in die erste Stellung, macht dasselbe nochmals und fährt so weiter. So oft man den Kolben in die Höhe zieht, dehnt

sich die im Rezipienten enthaltene Luft auch auf den Raum des Stiefels aus, wird also wieder mehr verdünnt. Wenn man also immer mehr Kolbenzüge macht, kann man immer mehr Luft aus dem Rezipienten herausbringen, die Luft im Rezipienten also immer dünner machen. Aber da die Luft nur dadurch herausgeht, daß sie sich ausdehnt, so ist klar, daß sie nie vollständig herausgeht, daß man also einen wirklich luftleeren Raum durch die Luftpumpe nicht herstellen kann, sondern nur einen luftverdünnten. Guericke meinte zuerst, die Luft sei bloß schwer, nicht expansibel, weshalb er bei seinen ersten Versuchen den Stiefel stets unterhalb des zu evakuierenden Gefäßes anbrachte. Die zweistiefelige Luftpumpe wurde bald von Robert Boyle konstruiert, der überhaupt die Luftpumpe wesentlich verbesserte.

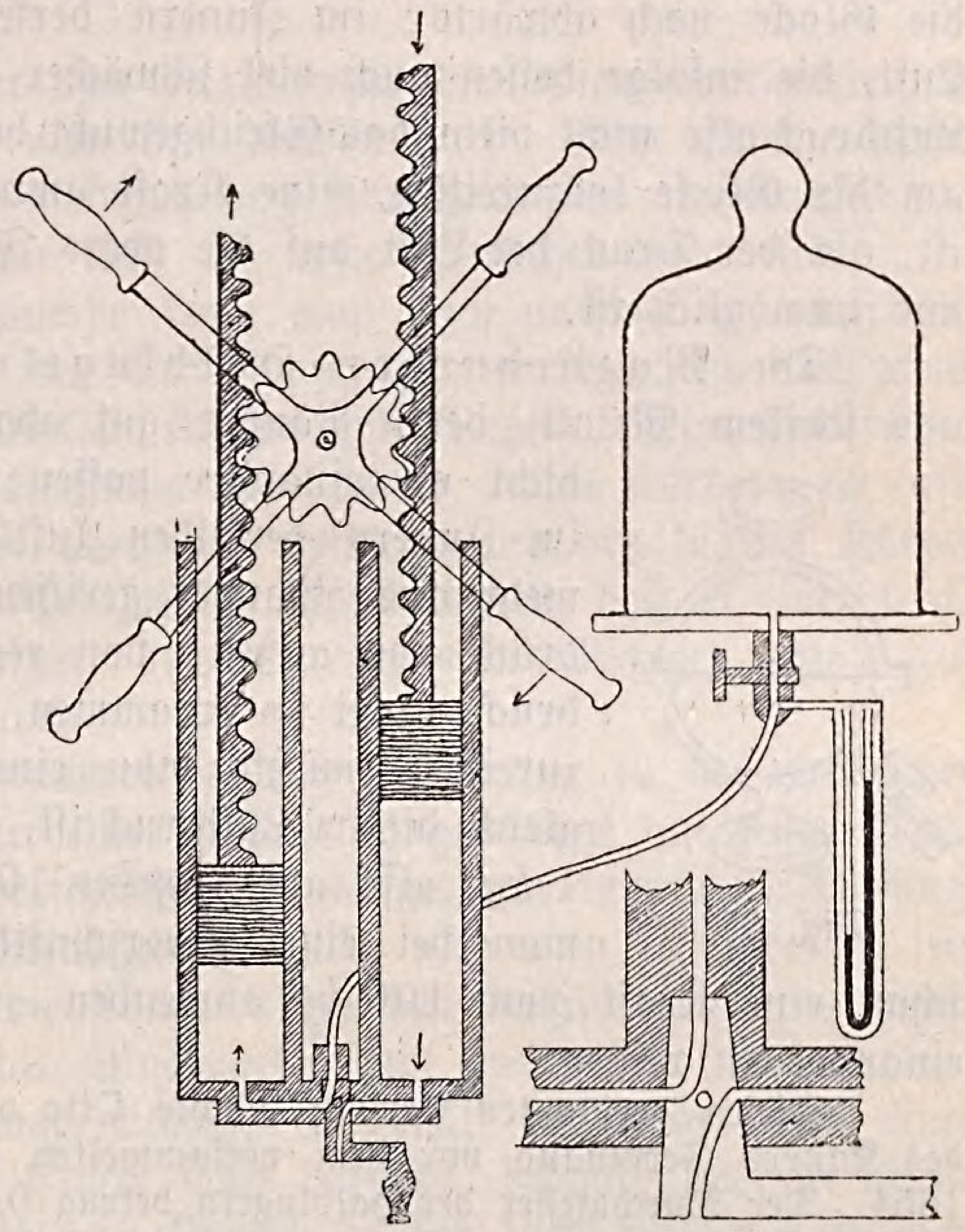


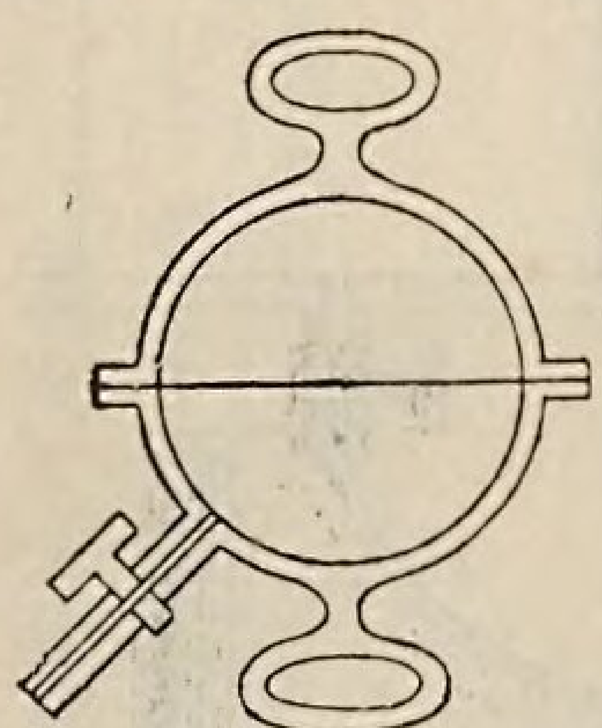
Fig. 56.

Die zweistiefelige Luftpumpe hat zwei neben einander stehende Stiefel; die Kolbenstangen sind mit Zähnen versehen, in welche ein Zahnrad beiderseits eingreift; wird dieses mittels eines Kurbelkreuzes gedreht, so geht der eine Kolben nach abwärts, der andere nach aufwärts und umgekehrt, wenn man das Rad nach der anderen Richtung dreht. Die Stiefel sind unten durch eine kurze Röhre verbunden, von deren Mitte das Rohr abzweigt, das zum Rezipienten führt. Ein dort steckender Hahn hat zwei krumme Bohrungen, durch welche der eine Stiefel mit dem Rezipienten, der andere mit der äußeren Luft verbunden ist; durch Drehen des Hahnes können die Stiefel in umgekehrter Ordnung mit Rezipient und äußerer Luft verbunden werden. Man kann so stets den Stiefel, dessen Kolben in die Höhe gezogen wird, mit dem Rezipienten verbinden, so daß die Stiefel abwechselnd den Rezipienten auspumpen.

39. Versuche mit der Luftpumpe.

Mit der Luftpumpe können viel interessante Versuche angestellt werden, die insbesondere das Expansionsbestreben der Luft und die Wirkung des Luftdruckes erläutern. Schon nach einigen Kolbenzügen haftet die Glocke so fest auf dem Teller, daß man sie nicht losreißen kann; denn von oben drückt der gewöhnliche, äußere Luftdruck auf die Glocke nach abwärts, im Innern derselber ist aber nur wenig Luft, die infolge dessen auch viel schwächer drückt und dem äußeren Luftdruck also nicht mehr das Gleichgewicht hält; deshalb müßte man, um die Glocke loszureißen, eine Kraft anwenden, die fast so groß ist, als der Druck der Luft auf die obere Fläche derselben, was für uns unmöglich ist.

Die Magdeburger Halbkugeln sind zwei Halbkugeln aus starkem Metall, deren Ränder gut abgeschliffen sind und luftdicht an einander passen; macht man den Raum im Innern derselben luftleer, so können sie nicht mehr aus einander gerissen werden; denn auf sie drückt von außen, von rechts und links der Luftdruck, preßt sie zusammen, und um sie auseinanderzureißen, müßte man eine Kraft aufwenden, die gleich diesem Luftdruck ist. Da derselbe auf 1 *qcm* 1 *kg*, also auf 1 *qdm* 100 *kg* beträgt, so müßte man bei einer Querschnittsfläche von nur 1 *qdm* schon eine Kraft von 100 *kg* anwenden, um die Halbkugeln von einander zu reißen.


Fig. 57.

Diesen berühmten Versuch machte Otto v. Guericke, auf Einladung des Kaisers Ferdinand vor dem versammelten Reichstage zu Regensburg 1654. Der Durchmesser der Halbkugeln betrug 0,67 Magdeburger Ellen und obwohl sie nicht ganz ausgepumpt werden konnten, waren doch 16 Pferde nicht im stande, sie von einander zu reißen. Dieser Versuch war damals so interessant, weil man die Luft bis dahin für nichts angeschaut hatte, oder doch nur für einen Stoff, der leicht und kraftlos ist, den man mit den Händen bei seite schieben kann, und von dem man nicht gut glauben konnte, daß er eine einigermaßen beträchtliche Wirkung hervorbringen könne. Um so interessanter und lehrreicher war es, durch diesen Versuch zu sehen, daß die Luft einen so ungemein großen Druck hervorbringen kann.

Wenn man eine Hohlkugel evakuiert, an eine mit Luft gefüllte Hohlkugel anschraubt und nun die Verbindung zwischen beiden herstellt, so zeigen sich beide Kugeln mit Luft gefüllt, da sich die Luft der einen Kugel gleichmäßig auf beide verbreitet hat. (Guericke.)

Legt man eine nur halb mit Luft gefüllte, zugebundene Schweinsblase unter dem Rezipienten und pumpt aus, so schwillt die Blase an: denn die in ihr enthaltene Luft dehnt sich aus, sobald durch das Auspumpen die äußere Luft weggeschafft wird. (Guericke.)

Stellt man auf den Teller der Luftpumpe eine unten abgeschliffene, oben sich trichterförmig erweiternde Glasröhre, bindet sie oben mit einem elastischen Kautschukblatt zu und pumpt die Luft aus, so wird durch den äußeren Luftdruck der Kautschuk nach abwärts gedrückt, dehnt sich immer mehr aus und platzt zuletzt. Legt man auf die Glasröhre eine luftdicht anschließende (nicht zu dicke) Glasplatte und pumpt die Luft unten weg, so wird die Glasscheibe zerdrückt.

Stellt man unter den Rezipienten ein Aneroidbarometer, so sieht man sofort, wenn man den Kolben in die Höhe zieht, wie der Zeiger sich bewegt und dadurch das Abnehmen des Luftdruckes anzeigt; denn je dünner die Luft ist, desto schwächer drückt sie.

Mittels der Luftpumpe kann man auch nachweisen, daß alle Körper gleich stark von der Erde angezogen werden, also auch gleich rasch fallen. Leichte, lockere Körper wie Papier, Flaumfedern ꝛc. fallen ja in der Luft langsamer als schwere, dichte Körper; im luftleeren Raum sieht man aber den lockeren und den dichten Körper gleich rasch fallen. Galilei bewies dies dadurch, daß er einen leichten Körper (Papierschnitzel) auf den schweren (Münze) legte, und beide zusammen fallen ließ.

Man kann auch nachweisen, daß die Körper in der Luft einen Auftrieb bekommen. An einer kleinen Wage hängt am einen Arme eine große, hohle, aber verschlossene Glaskugel, am andern ein Messinggewicht, das ihm das Gleichgewicht hält, also eben so schwer zu sein scheint. Bringt man die Wage unter den Rezipienten und pumpt ihn aus, so senkt sich die Glaskugel; denn da ihr Volumen größer ist als das des Messinggewichtes, so erhält sie in der Luft einen Auftrieb: im luftleeren Raum fehlt derselbe, deshalb sinkt sie herab.

Der Auftrieb, den ein Körper in der Luft erfährt, ist nicht beträchtlich; er beträgt nach dem archimedischen Gesetz 1,29 *g* für jedes *cdm* Volumen; um soviel erscheint jeder Körper in der Luft leichter, als er in Wirklichkeit ist. Bei gewöhnlichen Wägungen vernachlässigt man diesen Auftrieb, bei feinen physikalischen Wägungen muß er aber berücksichtigt werden.

40. Die Quecksilberluftpumpe.

Sie benützt das Torricellische Vakuum zum Auspumpen eines Rezipienten und ist folgendermaßen eingerichtet. Auf einem Stativ ist ein ziemlich großes (etwa 1 *l* haltendes) Glasgefäß A angebracht. Von ihm führt oben eine Röhre mit Dreiweghahn zum Glasteller. Nach unten ist am Gefäß eine ca. 80 *cm* lange Röhre angebracht, die sich fortgesetzt in einen Kautschukschlauch und in ein Glasgefäß B mündet, das mit Quecksilber gefüllt ist. Dies Gefäß kann durch einen Riemen, der sich um eine Welle schlingt, gehoben und gesenkt werden.

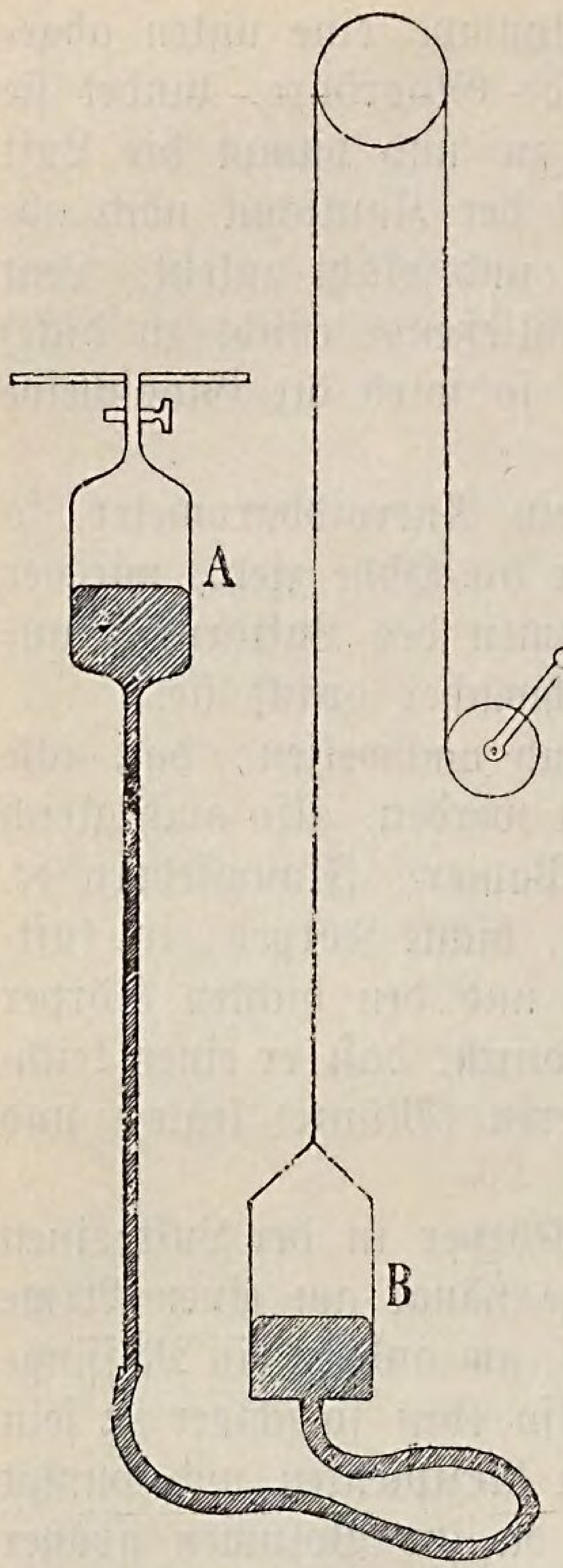


Fig. 58.

Will man auspumpen, so stellt man den Hahn so, daß er das Gefäß A mit der freien Luft verbindet, hebt das Gefäß B so hoch, daß es etwas höher steht als das Gefäß A; das Quecksilber läuft nun nach dem Gesetz der kommunizierenden Röhren in das feste Gefäß, füllt dies ganz an und würde beim Hahn herauslaufen, wenn man ihn nicht im selben Moment schließen würde. Senkt man nun das bewegliche Gefäß ganz herab, so steht es um mehr als 76 *cm* tiefer als das feste Gefäß; deshalb läuft das Quecksilber aus dem festen Gefäß wie beim Torricellischen Versuch, es bildet sich also im Gefäß A ein ganz luftleerer Raum von ziemlich großem Volumen. Wenn man nun den Hahn so stellt, daß er das Gefäß A mit dem Rezienten verbindet, so strömt die Luft aus dem Rezipienten in den luftleeren Raum und wird dadurch verdünnt. Man fährt auf dieselbe Weise fort und kann die Verdünnung im Rezipienten immer weiter treiben. Mit guten Apparaten dieser Art hat man die Luft mehr als eine Million mal dünner gemacht.

41. Zusammendrückbarkeit der Luft. Mariotte'sches Gesetz.

Die Gesetze über die Zusammendrückbarkeit der Luft erfährt man auf folgende Weise:

Man nimmt eine 2—3 *m* lange Glasröhe, die oben offen ist, sich unten umbiegt, dann wieder etwa 50 *cm* hoch hinaufgeht und dort verschloßen ist. Schüttet man Quecksilber hinein, bis der untere Verbindungskanal voll ist, so hat man im kurzen Schenkel ein gewisses Volumen Luft abgesperrt; auf dieses drückt der äußere Luftdruck, also eine Atmospäre. Gießt man noch mehr Quecksilber hinein, so steht es im langen Schenkel höher als im kurzen, drückt auf die Luft im kurzen Schenkel und preßt sie dadurch auf einen kleineren Raum zusammen. Man gießt nun gerade so viel Quecksilber hinein, bis die Luft im kurzen Schenkel auf die Hälfte des ursprünglichen Volumens zusammengepreßt ist, findet, daß das Quecksilber im langen Schenkel um 76 *cm* höher steht als im kurzen, und weiß, daß der Druck einer Quecksilbersäule von 76 *cm* Höhe gleich dem Luftdruck ist. Auf die eingesperrte Luft drückt demnach 1) die äußere

Luft mit der Kraft von 1 Atmosphäre, denn sie drückt auf das Quecksilber im langen Schenkel, und dieser Druck pflanzt sich im Quecksilber fort, 2) eine Quecksilbersäule von 76 *cm*, die auch gleich einer Atmosphäre ist; das macht zusammen 2 Atmosphären, 2mal soviel als vorher. Man schließt: Durch den zweimal größeren Druck ist die Luft auf ein zweimal kleineres Volumen zusammengedrückt worden.

Man gießt noch mehr Quecksilber hinzu, bis die Luft im kurzen Schenkel auf ein Drittel ihres ursprünglichen Volumens zusammengepreßt ist, sieht, daß im langen Schenkel das Quecksilber um 152 = 2.76 *cm* höher steht als im kurzen; das macht 2 Atmospären, so daß mit dem äußeren Luftdruck 3 Atmospären auf die Luft im kurzen Schenkel drücken, 3mal so viel als zuerst; ihr Volumen ist 3mal kleiner als zuerst. So kann man weiterfahren, und findet so das Gesetz; je größer der Druck ist, den man auf ein Gas ausübt, desto kleiner ist sein Volumen oder: **die Volumina eines Gases verhalten sich umgekehrt wie die Druckkräfte;** bezeichnet man die Druckkräfte mit P und P′, die Volumina mit V und V′, so ist:

$$P : P' = V' : V. \quad \text{(I)}$$

Dieses wichtige Gesetz lehrt, wie das Volumen eines Gases blos von dem Drucke abhängt, der auf dasselbe ausgeübt wird, und heißt das **Mariotte'sche Gesetz.** (Robert Boyle 1666, Mariotte 1684.)

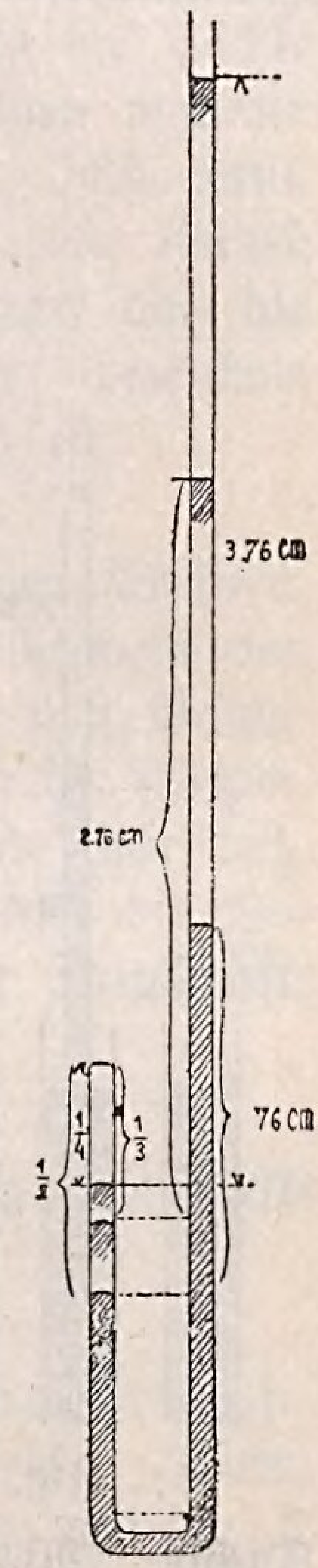


Fig. 59.

Dasselbe gilt auch für verdünnte Gase, was auf folgende Weise gezeigt wird. In ein ziemlich weites und sehr tiefes Gefäß voll Quecksilber taucht man eine unten offene, oben durch einen Hahn verschließbare Glasröhre fast ganz, bis auf etwa 17 *cm* ein. Schließt man nun den Hahn, so hat man in der Röhre ein gewisses Volumen Luft (von 17 *cm* Länge) abgesperrt, auf dem der äußere, durch das Quecksilber fortgepflanzte Luftdruck lastet. Zieht man nun die Röhre etwas heraus, so sieht man, daß das Quecksilber in der Röhre höher steht als im Gefäß, daß also auf die abgesperrte Luft nicht mehr der ganze Luftdruck drückt, sondern sich hievon der Druck der gehobenen Quecksilbersäule subtrahiert; zugleich sieht man, daß die Luft in der Röhre sich etwas ausgedehnt hat. Man zieht die Röhre soweit heraus, bis das Volumen der Luft zweimal größer ist als zuerst (34 *cm*), so beträgt die gehobene Quecksilbersäule 38 *cm* = $^1/_2 \cdot 76$ *cm*. Auf die eingesperrte Luft drückt also nicht mehr der ganze äußere Luftdruck, sondern um diese halbe Atmosphäre weniger;

folglich bleibt bloß ein Druck von $^1/_2$ Atmosphäre; **der Druck ist zweimal kleiner als zuerst, das Volumen der Luft zweimal größer.**

Man zieht die Röhre noch weiter heraus, bis das Volumen der Luft 3mal größer ist als zuerst (51 *cm*), mißt die gehobene Quecksilbersäule und findet $50\,^1/_2$ *cm* = $^2/_3$ Atm. Das subtrahiert sich vom äußeren Luftdruck, bleibt $^1/_3$ Atmosphäre; der Druck ist also 3mal kleiner als zuerst, das Volumen ist 3mal größer. So fährt man fort und findet auch hier allgemein das Gesetz bestätigt: **je kleiner der Druck, desto größer das Volumen.**

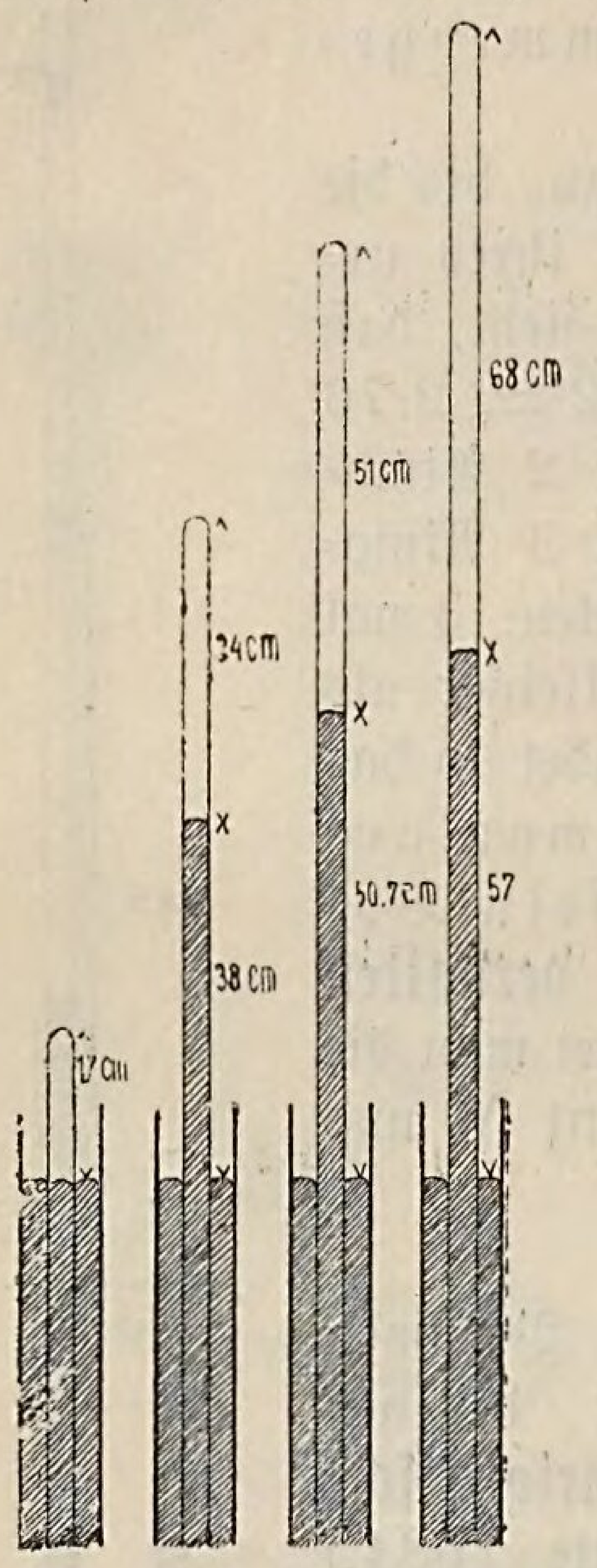


Fig. 60.

Unter Expansivkraft oder Spannung der Luft versteht man den Druck, den eingeschlossene Luft auf die Wände des Gefäßes ausübt. Sie ist die Folge des Ausdehnungsbestrebens der Luft. Hat man etwa unter den Rezipienten der Luftpumpe ein Aneroidbarometer stehen, und ist der Rezipient noch mit der äußeren Luft verbunden, so drückt die äußere Luft nach dem Gesetze des Boden- und Seitendruckes auf das Barometer. Aber auch wenn man den Hahn absperrt, bleibt dieser Druck bestehen und ist nun anzusehen als Folge des Ausdehnungsbestrebens der Luft. Er hängt nicht ab vom Gewicht der im Rezipienten enthaltenen Luft, sondern nur von ihrer Dichte. Wenn man nämlich durch Auspumpen die Dichte der Luft geringer macht, so wird ihr Druck geringer, was man am Zurückgehen des Barometerzeigers sieht. Bei den Versuchen an der Mariotteschen Röhre übt die im kurzen Schenkel abgesperrte Luft auf die Oberfläche des Quecksilbers einen Druck aus, der offenbar so groß ist als der von außen wirkende Druck, da sich beide Drücke das Gleichgewicht halten; man sieht also gerade an diesen Versuchen auch noch: wenn das Volumen der eingesperrten Luft 2, 3 . . . . . mal kleiner wird, so wird auch ihre Expansivkraft 2, 3 . . . . . mal größer und umgekehrt: **die Expansivkräfte eines Gases verhalten sich umgekehrt wie seine Volumina.** Bezeichnet man die Expansivkräfte mit E und E′, so ist

$$E : E' = V' : V. \quad \text{(Ia.)}$$

Stets wenn die Luft in einem Gefäße mit der äußeren Luft in Verbindung steht, ist sie nur dann in Ruhe, wenn die Expansivkraft der eingeschlossenen Luft gleich ist dem von außen auf sie wir-

kenden Drucke, gleich dem Drucke, unter dem sie steht. Es hängt deshalb die Formel I mit der Formel Ia dadurch zusammen, daß statt der Druckkräfte P und P′ die Expansivkräfte E und E′ gesetzt sind.

Unter Dichte eines Körpers versteht man die Anzahl der in einer Raumeinheit, etwa 1 *ccm*, enthaltene Moleküle. Wenn man diese Zahl auch nicht berechnen, also die Dichte nicht wirklich finden kann, so kann man doch die Dichten mancher Körper mit einander vergleichen; insbesondere ist klar, daß wenn man einen Körper, der eine gewisse Dichte hat, auf einen kleinen Raum zusammenpreßt, seine Dichte größer wird, derart daß **die Dichten sich verhalten umgekehrt wie die Volumina;** bezeichnet man also die Dichten dieses Körpers mit d und d′, so ist

$$d : d = v' : v. \quad (H = \text{Hilfssatz.})$$

Dieser Satz gilt nicht etwa bloß von luftförmigen Körpern, ist also kein Mariotte'scher Satz, sondern gilt auch allgemein von allen Körpern, also etwa auch von einem Schwamme, von Baumwolle, Federn, Silber 2c., kurz von jedem zusammendrückbaren Körper.

Verbindet man diesen Satz mit dem ersten Mariotte'schen Satz, nach welchem die Druckkräfte sich verhalten wie umgekehrt die Volumina, so folgt: **Die Dichten verhalten sich wie die Druckkräfte eines Gases:**

$$P : P' = d : d' \quad (II),$$

und in Verbindung mit dem Satz Ia folgt: **die Expansivkräfte eines Gases verhalten sich wie seine Dichten:**

$$E : E' = d : d' \quad (IIa).$$

Ferner: je größer die Dichte eines Körpers ist, desto größer ist sein sp. G., also $d : d' = s : s'$, (H). Dieser Satz gilt auch von allen Körpern; verbindet man ihn mit II, so folgt: **Die spezifischen Gewichte eines Gases verhalten sich wie die äußeren Druckkräfte**

$$P : P' = s : s' \quad (III),$$

und verbunden mit IIa folgt: **Die Expansivkräfte eines Gases verhalten sich wie die spezifischen Gewichte:**

$$E : E' = s : s' \quad (IIIa).$$

Dies sind die wichtigsten Fassungen des Mariotte'schen Gesetzes. Sie sind so aufgestellt, daß die Druckkräfte als die von außen wirkenden Ursachen erscheinen, welche die Zustände des Gases, nämlich sein Volumen und seine Dichte beeinflussen (I, II, III) und daß anderseits die Expansivkraft als abhängig erscheint von den Zuständen (Volumen und Dichte), in welchen das Gas sich befindet, oder in welche man es gebracht hat.

Sollen zwei Gasmassen in einem einzigen Raume vereinigt werden, wobei sie dann von selbst ihren Druck ausgleichen, so kann

man zur Berechnung die Sätze verwenden: Bei gleichen Volumen addieren sich die Dichten also auch die Druckkräfte. Bei gleichem Druck addieren sich die Volumen.

42. Spezifisches Gewicht der Gase. Luftballon.

Am Barometer erkennt man, daß der Luftdruck auf einem Berge kleiner ist als im Thale; daraus folgt, daß auch die Dichte und das sp. G. der Luft auf dem Berge kleiner ist als im Thale; so ist die Luft auf dem Mont Blanc nahezu 2 mal dünner als am Meere. Streicht die Luft vom Meere her über ein Gebirge, so dehnt sie sich beim Aufsteigen aus und wird beim Absteigen wieder zusammengedrückt (Guericke). Da auch das sp. G. der Luft in der Höhe kleiner ist, so muß man dort mit dem Barometer um mehr als 10 *m* steigen, damit es um 1 *mm* sinkt; denn die (kleinen) Höhen, um welche man steigen muß, verhalten sich umgekehrt wie die sp. G. der Luft, also auch umgekehrt wie die Barometerstände.

Das spezifische Gewicht der Luft wird stets bei einem Barometerstande von 760 *mm* angegeben; es ist 0,001293. Das sp. G. bei einem anderen Barometerstande wird berechnet nach dem Satz:

(III) $P : P' = s : s'$; z. B. wie groß ist das sp. G. der Luft bei einem Barometerstande von 715 *mm*?

$$760 : 715 = 0{,}001293 : s',$$

$$s' = \frac{0{,}001293 \cdot 715}{760} = 0{,}001216.$$

Dasselbe gilt auch bei allen Gasen. Z. B. ich habe das sp. G. eines Gases bei 722 *mm* gefunden als 0,00117, wie groß ist dessen sp. G. bei 760 *mm*?

$$722 : 760 = 0{,}00117 : x$$

$$x = \frac{760 \cdot 0{,}00117}{720} = 0{,}001235.$$

Man gibt meistens das sp. G. der Gase nicht in bezug auf Wasser, sondern in bezug auf Luft an; ist also das sp. G. der Kohlensäure = 1,5291, so heißt das: Kohlensäure ist 1,53 mal schwerer als Luft; will man hieraus das sp. G. der Kohlensäure in bezug auf Wasser haben, so muß man es mit 0,00129 multiplizieren nach dem Satze:

$$\text{sp G}\,\frac{\text{Kohlens.}}{\text{Wasser}} = \text{sp G}\,\frac{\text{Kohlens.}}{\text{Luft}} \cdot \text{sp G}\,\frac{\text{Luft}}{\text{Wasser}}$$

$$\text{sp G} = 1{,}5291 \cdot 0{,}001293 = 0{,}001977.$$

Der Luftballon.

Jeder Körper bekommt in der Luft einen Auftrieb, der gleich dem Gewichte der verdrängten Luftmasse ist. Dieser Auftrieb, nicht

beträchtlich bei festen und flüssigen Körpern, ist von wesentlichem Einfluß bei luftförmigen; denn da z. B. Wasserstoffgas ein sp. G. von 0,06926 hat, also ein *cbm* Wasserstoff 0,089 *kg* wiegt, in der Luft aber einen Auftrieb von 1,293 *kg* erfährt, so wird dieses und jedes *cbm* Wasserstoff von der Luft nach aufwärts getrieben mit der Kraft von 1,204 *kg*. Dasselbe gilt von jedem Gase, das spezifisch leichter ist als die Luft, also auch von warmer Luft, die von kälterer umgeben ist, da die warme Luft leichter ist als kalte.

Füllt man einen aus leichtem Stoffe gefertigten Ballon mit einem leichten Gas, also Wasserstoff, Leuchtgas, warmer Luft, und ist der Auftrieb des Gases noch größer als das Gewicht des Stoffes, aus dem der Ballon gefertigt ist, so steigt der Ballon in die Höhe; es ist ein sogenannter Luftballon.

Der erste Luftballon wurde von Montgolfier 1783 gefertigt und mit erwärmter Luft gefüllt, in demselben Jahre füllte Charles einen Ballon mit Wasserstoff; bald darauf füllte man sie mit dem billigen Leuchtgas. Vielfach wurden sie von Naturforschern benutzt, um den Zustand der Luft und manche Erscheinungen in höheren Luftschichten zu untersuchen, so zuerst von Pilastre du Rocier und Marquis d'Arlandes 1783, Gay-Lussac 1804. Die größte Höhe (9000 *m*) erreichte Glaisher 1864. Viele Versuche wurden schon gemacht, den Luftballon lenkbar zu machen.

43. Kompressionspumpe. Taucherglocke.

Will man Luft in einen Raum hineinpressen, so benützt man eine Kompressionspumpe, die ähnlich wie eine Evakuationspumpe eingerichtet ist, nur werden die Hähne stets umgekehrt gestellt; zieht man den Kolben in die Höhe, so verbindet der Hahn den Stiefel mit der äußeren Luft, so daß sich der Stiefel mit Luft füllt; drückt man den Kolben hinunter, so verbindet der Hahn den Stiefel mit dem Rezipienten, in welchen die Luft gepreßt werden soll.

Man preßt Leuchtgas in cylinderförmige Gefäße von etwa $1/2$ *cbm* Inhalt bis zu einem Drucke von 50 Atm. Indem man solche Gefäße im Gepäckwagen des Eisenbahnzuges mitnimmt, kann man während der Fahrt den Zug mit Gas beleuchten.

An gefährlichen Stellen des Meeres oder der Flußmündungen bringt man Leuchtbojen an, große kugelförmige Gefäße aus starkem Eisenblech, die am Meeresgrund verankert sind; sie werden mit stark komprimiertem Leuchtgas gefüllt, das eine oben in einer Laterne befindliche Gasflamme mehrere Monate lang speist.

Eine Taucherglocke ist ein großer, glockenförmiger Kasten aus starkem Eisenblech; sie wird mittels Ketten auf den Grund des Meeres hinabgelassen, damit die in ihrem Innern befindlichen Männer dort arbeiten können, ohne vom Wasser wesentlich behindert zu sein. Durch den Druck des Wassers wird aber die Luft in der Glocke stark zusammengepreßt, bei 10 *m* Tiefe auf die Hälfte, bei 20 *m* Tiefe auf $1/3$ ihres Volumens. Um also die Glocke mit Luft

gefüllt zu halten, wird schon während des langsamen Herablassens vom Schiffe aus durch Kompressionspumpen Luft in die Glocke gepreßt, so daß die Arbeiter, am Meeresgrunde angekommen, nur in ganz seichtem Wasser stehen. Weiteres Pumpen versorgt sie beständig mit frischer Luft, so daß sie einige Stunden an der Arbeit bleiben können. Von dem starken Drucke der Luft haben die Arbeiter keine weiteren Beschwerden, da sich auch in ihren Lungen solche Luft befindet, und sich deshalb innerer und äußerer Druck das Gleichgewicht halten.

Auf dem großen Drucke komprimierter Luft beruht auch die Wirkung des Schießpulvers und anderer Sprengstoffe (Schießbaumwolle, Dynamit). Der Sprengstoff verwandelt sich nämlich durch die Entzündung rasch und fast vollständig in Gas, welches, wenn es nur unter dem Drucke einer Atmosphäre stände, einen viel größeren Raum einnehmen würde als der Stoff, aus dem es entstanden ist. Da es aber im Momente der Entzündung nur denselben Raum hat wie das Pulver, so ist es komprimiert; es hat eine sehr große Expansivkraft, die durch die Verbrennungshitze noch gesteigert wird, und treibt deshalb die Kugel aus dem Geschütze oder sprengt den Felsen. Der Druck der Pulvergase bei groben Geschützen beträgt 1500—2500 Atm.

44. Die Luft als elastischer Körper.

Wenn man Luft zusammenpreßt, so sucht sie sich wieder auszudehnen: sie strömt bei einer Öffnung heraus, welche sie mit der äußeren Luft verbindet, sie schiebt den Kolben, durch welchen man sie zusammenpreßt, wieder zurück u. s. f. Umgekehrt, wenn man in einem Raume die Luft verdünnt hat und an ihm eine Öffnung anbringt, so strömt die äußere Luft wieder hinein, oder der Kolben, den man heraufgezogen hat, um die Luft in dem Raume zu verdünnen, geht wieder nach abwärts, wenn die Kraft aufhört an ihm zu ziehen, und zwar soweit, bis die Luft ihr früheres Volumen wieder angenommen hat. Man nehme etwa ein gut ausgedrehtes Metallrohr, wie z. B. einen Luftpumpenstiefel, stelle den luftdicht schließenden Kolben etwa in die Mitte und verschließe den Stiefel unten, so daß der untere Teil mit gewöhnlicher Luft angefüllt ist. Drückt man nun den Kolben nach abwärts, so wird er nachher durch die Expansivkraft der komprimierten Luft wieder bis zur Mitte zurückgeschoben; zieht man den Kolben nach aufwärts, so wird er nachher durch den Druck der äußeren Luft, da die nun verdünnte Luft im Stiefel weniger stark drückt, wieder nach abwärts gedrückt, und zwar auch wieder bis zu seiner ersten Stellung. Die Luft zeigt demnach ein ähnliches Verhalten, wie elastische Körper; man hat deshalb die Gase elastisch-flüssige Körper genannt, und nennt sie sogar vollkommen elastisch, weil sie sich beliebig

stark zusammendrücken und ausdehnen lassen und doch wieder ihr ursprüngliches Volumen unverändert annehmen, also nicht an eine Grenze der Elastizität gebracht werden können. Es ist aber nicht richtig, sie elastisch in dem Sinne zu nennen, wie man feste und flüssige Körper elastisch nennt; denn ein Bestreben bei Ausdehnung wieder in die ursprüngliche kleinere Gestalt zurückzukehren, haben die luftförmigen Körper überhaupt nicht, sondern sie haben das Bestreben, sich geradezu immer weiter und weiter auszudehnen. Wenn wir also sehen, daß der Kolben, den wir in die Höhe gezogen haben, wieder zurückgeht, wenn die Kraft nicht mehr wirkt, so kommt das nicht etwa daher, daß die unter dem Kolben befindliche ausgedehnte Luft das Bestreben hätte, wieder in die ursprüngliche Größe zurückzukehren, sondern diese ausgedehnte Luft hat das Bestreben, sich immer weiter und weiter auszudehnen, und nur der auf die obere Fläche des Kolbens wirkende Luftdruck ist es, der jetzt stärker wirkt als die Expansivkraft der unterhalb befindlichen ausgedehnten Luft, und deshalb den Kolben nach abwärts drückt und die verdünnte Luft entgegen ihrem Ausdehnungsbestreben wieder auf ihr ursprüngliches Volumen zusammendrückt.

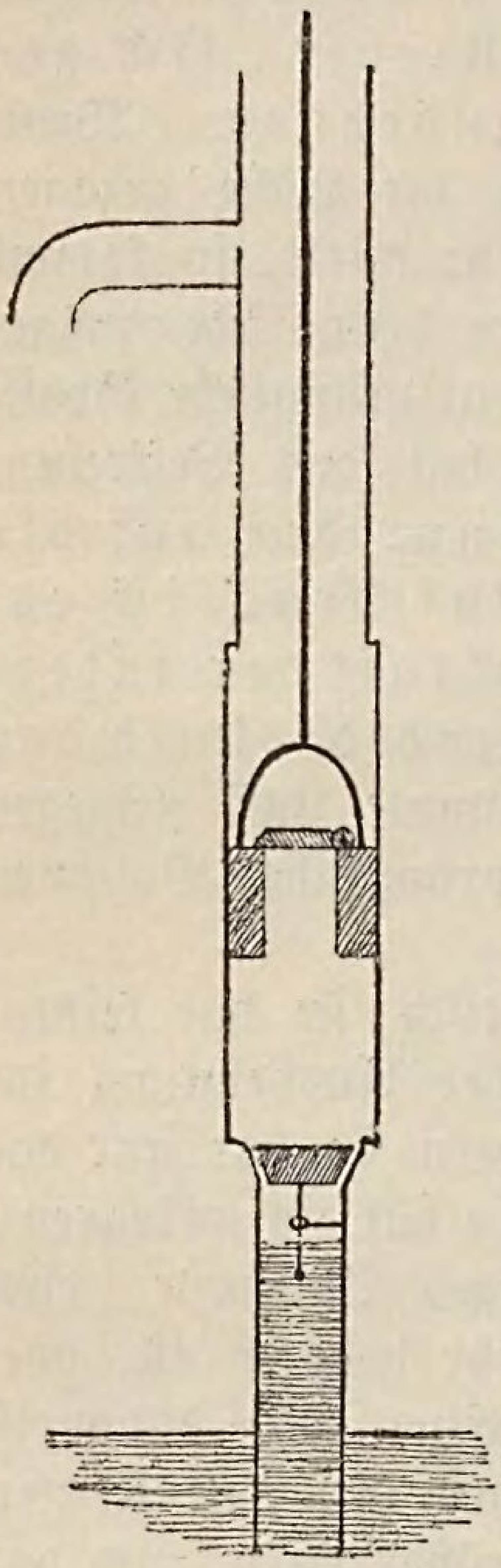
Man muß also sagen: Luft ist nicht elastisch, sie hat keineswegs das Bestreben, nach Zusammendrückung oder Ausdehnung ihr ursprüngliches Volumen wieder anzunehmen, sondern sie hat nur das eine Bestreben, sich immer weiter auszudehnen, sie hat ein unbegrenztes Expansionsvermögen: sie hat kein selbständiges Volumen; dasselbe ist bloß abhängig von dem Raum, der ihr geboten ist, oder von der Kraft, mit der auf sie gedrückt wird. Eine Folge davon ist allerdings, daß bei größerem Drucke das Volumen der Luft kleiner, bei nachlassendem Drucke ihr Volumen wieder größer wird, und daß deshalb die Luft Erscheinung zeigt, die mit den Erscheinungen der Elastizität nahe verwandt sind. Aus diesem Grunde und in diesem Sinne kann man die Luft und ebenso alle Gase elastisch nennen.

45. Die Pumpen.

Die Saugpumpe dient dazu, Wasser aus einem Brunnen heraufzuschaffen oder zu heben; daher wird sie auch Hebepumpe genannt. Sie besteht aus einem Pumpenstiefel, einem gut ausgedrehten Metallrohr, das nach unten als Saugrohr sich bis zum Wasser fortsetzt. Am unteren Ende des Stiefels befindet sich ein nach aufwärts sich öffnendes Ventil, das Saug- oder Bodenventil. Im Stiefel befindet sich der luftdicht anschließende Kolben, der mittels der Kolbenstange auf und ab bewegt werden kann. Der Kolben ist durchbohrt und hat oben ein nach oben sich öffnendes

Ventil, das Kolben- oder Druckventil. Oben setzt sich der Stiefel in das nach aufwärts führende Steigrohr fort, das zum Ausflußrohre führt.

Zieht man den Kolben aufwärts, so wird die zwischen den beiden Ventilen befindliche Luft verdünnt; es bleibt dann das Kolbenventil geschlossen, weil der äußere Luftdruck auf dasselbe stärker drückt als die verdünnte Luft; dagegen öffnet sich das Saugventil, weil die im Saugrohr befindliche gewöhnliche Luft stärker drückt als die verdünnte Luft, und es strömt Luft aus dem Saugrohr in den Stiefel; die Luft im Saugrohr wird dadurch dünner, drückt nicht mehr so stark auf das Wasser als der äußere Luftdruck, folglich steigt das Wasser im Saugrohr etwas in die Höhe.


Fig. 61.

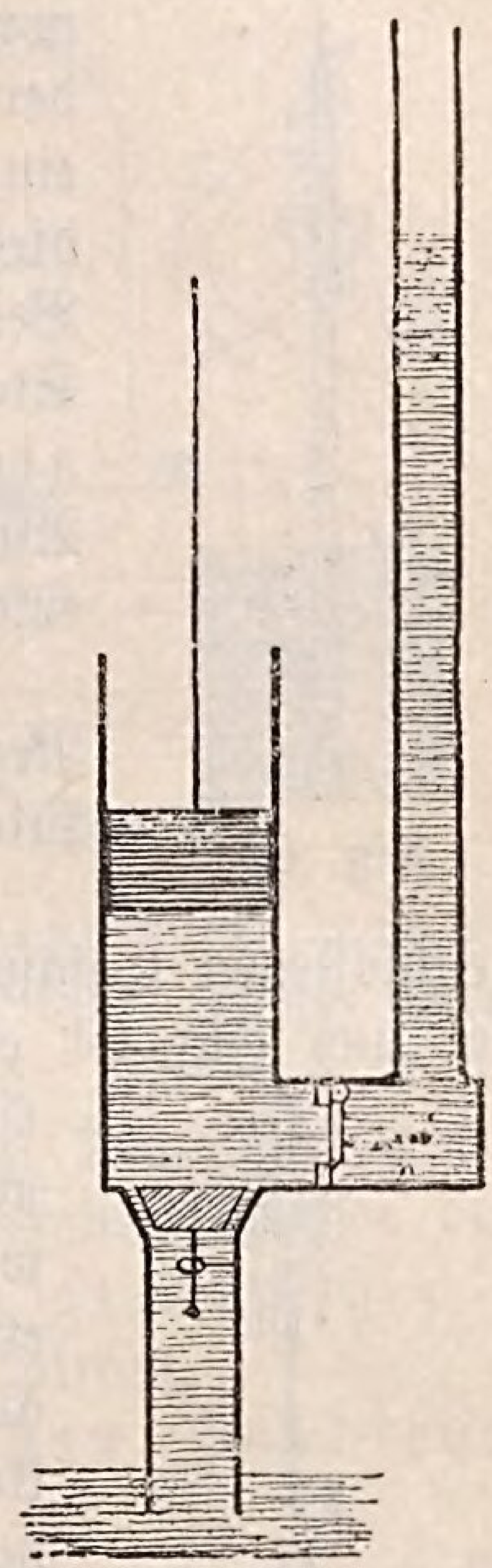
Drückt man nun den Kolben nach abwärts, so hat sich zunächst das Bodenventil durch sein eigenes Gewicht geschlossen, die Luft im Stiefel wird zusammengedrückt, bekommt eine größere Expansivkraft als die äußere Luft, hebt deshalb das Kolbenventil und strömt dort hinaus. Die Pumpe hat zunächst als Luftpumpe gewirkt, indem sie einen Teil der im Saugrohr enthaltenen Luft entfernt hat.

Pumpt man weiter, so wiederholt sich derselbe Vorgang, wodurch die Luft im Saugrohr immer dünner wird; deshalb steigt auch das Wasser im Saugrohr, getrieben durch den auf das Wasser im Brunnen wirkenden äußeren Luftdruck, immer höher und kommt später sogar in den Stiefel; drückt man nun nach abwärts, so strömt das im Stiefel befindliche Wasser durch das Kolbenventil auf die obere Seite des Kolbens; zieht man wieder in die Höhe, so wird einerseits das über dem Kolben befindliche Wasser nach aufwärts gehoben, andrerseits würde im Stiefel zwischen den beiden Ventilen ein luftleerer Raum entstehen, weshalb durch den äußeren Luftdruck wieder Wasser in den Stiefel gedrückt wird. Die Pumpen an unseren Brunnen sind gewöhnlich solche Saugpumpen. Ist das Wasser in der angegebenen Weise angesaugt, und schließen die Ventile gut, so bleibt die Pumpe mit Wasser gefüllt, und gibt, wenn man später wieder pumpt, schon beim ersten Zuge Wasser. (Diese Erklärung zuerst von Robert Boyle 1666.)

Da das Wasser im Saugrohr bis zum Kolbenventil nur durch den äußeren Luftdruck gehoben wird, dieser aber das Wasser bloß ca. 10 *m* hoch emportreiben kann, so darf man den Stiefel nicht

höher als 10 *m* über dem Wasserspiegel anbringen, nimmt sogar in der Regel höchstens 8 *m*. Bei tiefen Brunnen ist dies oft unangenehm, aber nicht zu vermeiden.

Die Druckpumpe dient dazu, das Wasser aus dem Brunnen herauszupumpen, und es dann noch auf eine gewisse Höhe zu heben. Sie besteht wie die Saugpumpe aus Pumpenstiefel, Saugrohr und Saugventil; der Kolben aber ist massiv; am unteren Ende des Pumpenstiefels zweigt sich nach der Seite die Steigröhre ab, an deren Anfang ein nach auswärts sich öffnendes Ventil, das Druck- oder Steigventil sich befindet, und die sich dann nach aufwärts fortsetzt bis zur Ausflußöffnung.


Fig. 62.

Geht der Kolben aufwärts, so öffnet sich das Saugventil, die Luft strömt aus dem Saugrohr in den Stiefel, und das Wasser steigt im Saugrohr; geht der Kolben abwärts, so wird die Luft im Stiefel zusammengepreßt; öffnet das Steigventil und tritt dort aus; durch weiteres Pumpen wird die Luft im Saugrohr immer mehr verdünnt, so daß das Wasser immer höher steigt, bis es in den Stiefel selbst gelangt; beim Herabdrücken des Kolbens wird es dann in die Steigröhre getrieben und kann in ihr beliebig hoch emporgetrieben werden.

Bei der Saugpumpe wird das Wasser nur gehoben, wenn der Kolben nach aufwärts geht; bei der Druckpumpe wird sowohl beim Aufwärts- als auch beim Abwärtsgehen des Kolbens Wasser gehoben, und die Arbeit ist dadurch gleichmäßiger verteilt; deshalb wendet man mit Vorliebe eine Druckpumpe an, wenn die Pumpe durch eine Dampfmaschine getrieben werden soll.

46. Die Spritzen.

Der Heronsball ist ein ballonartiges starkwandiges Metallgefäß. Er wird etwa halb mit Wasser gefüllt, dann wird in seine obere Öffnung eine Röhre luftdicht eingeschraubt, die fast bis an den Boden des Gefäßes reicht und oben in eine feine Ausflußöffnung endigt. Durch einen Hahn kann man die Röhre schließen und öffnen. Man preßt nun durch eine Kompressionspumpe noch mehr Luft zu der schon im Ballon befindlichen Luft, wodurch sie eine größere Expansivkraft bekommt. Öffnet man nun den Hahn, so drückt die Luft im Innern des Ballons stärker auf das Wasser als die äußere Luft; dasselbe wird deshalb in Form eines starken, hochspringenden Strahles herausgepreßt.

Die Steighöhe des Strahles nimmt dabei ab, je mehr die Luft durch Ausdehnung an Expansivkraft verliert, und verschwindet, wenn ihre Expansivkraft gleich dem äußeren Luftdruck geworden ist.

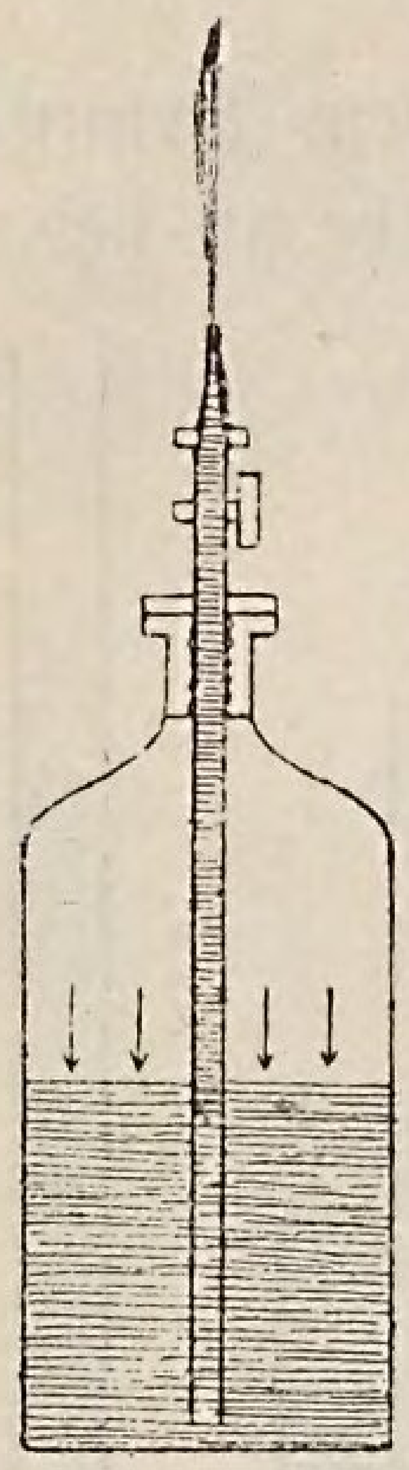


Fig. 63.

Hat die Luft im Ballon etwa eine Spannkraft von 2 Atmospären, so wirkt diesem Druck entgegen der äußere Luftdruck gleich einer Atmospäre, so daß ein Überdruck von einer Atmosphäre übrig bleibt; dieser kann aber Wasser auf ca. 10 *m* emporpressen. Bei einer Spannung von 3 Atmosphären ist die Steighöhe ca. 20 *m* u. s. f. Diese Steighöhe wird nicht ganz erreicht, weil das herausspringende Wasser in der Luft einen Reibungswiderstand erfährt, der seine Energie verringert.

Stellt man einen kleinen Heronsball unter den Rezipienten der Luftpumpe, so fängt er beim Evakuieren zu springen an. (Robert Boyle.)

Der Heronsbrunnen besteht aus den zwei geschlossenen Gefäßen A und B, die durch die Röhren R und S in der aus Fig. 64 ersichtlichen Art verbunden sind. Auf A steht noch ein Auffanggefäß C und aus A reicht eine Röhre mit feiner Mündung (Spritzenöffnung) heraus. A wird mit Wasser gefüllt, B ist leer. Wird nun etwas Wasser in C geschüttet, so springt das Wasser aus A durch die Spritzenöffnung in Form eines kleinen Springbrunnens heraus. Denn das Wasser von C dringt durch R in B ein, verdichtet durch seinen Druck (Höhe bc) die Luft in B, also auch durch die Röhre S die Luft in A; diese treibt das Wasser durch ihren Überdruck (gleich der Höhe bc) aus der Spritzenöffnung, und das Wasser erreicht eine Höhe, welche, von s aus gemessen, um as kleiner als bc. Es springt, so lange das Wasser in A reicht oder bis B sich mit Wasser gefüllt hat; dann muß A gefüllt und B entleert werden. Dieser Apparat bietet ein gutes Beispiel dafür, daß eine Wassersäule einen Druck ausübt, daß sich dieser Druck in der Luft fortpflanzt und selbst wieder einen Druck ausübt. Durch Herabsinken des Wassers von C nach B kann Wasser von A aus gehoben werden. Er wird zu kleinen Zimmerfontänen verwendet.

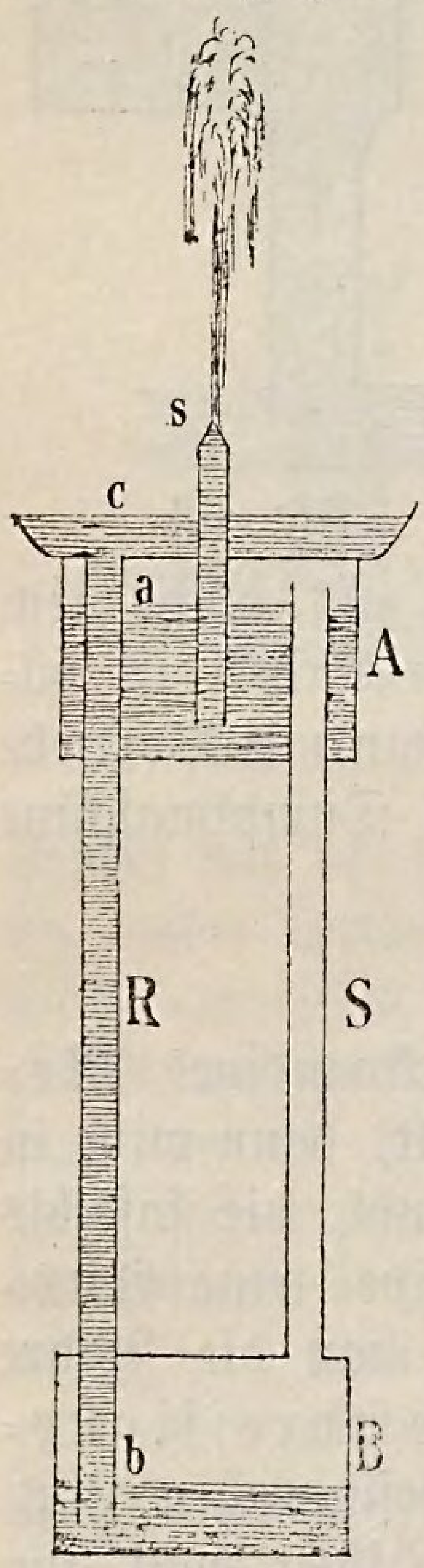


Fig. 64.

Eine Spritze besteht aus einer Druckpumpe und einem Windkessel. Letzterer ist ein starkwandiges, ballonartiges Gefäß, das in das Steigrohr eingeschaltet ist; das Steigrohr führt unten in den Windkessel,

geht auf der andern Seite unten wieder heraus, setzt sich weiter fort, oft in einen Schlauch, und mündet in einer Spritzenöffnung, dem Mundstück.

Wenn nun gepumpt wird, so verschließt man die Spritzenöffnung zuerst mit einem Hahne oder bloß mit dem Daumen, so sammelt sich das durch die Pumpe ins Steigrohr gepreßte Wasser im Windkessel, indem es die dort befindliche Luft zusammenpreßt. Läßt man nun die Spritzenöffnung frei, so drückt die Luft im Windkessel das Wasser in Form eines starken Strahles heraus, ähnlich wie beim Heronsball.

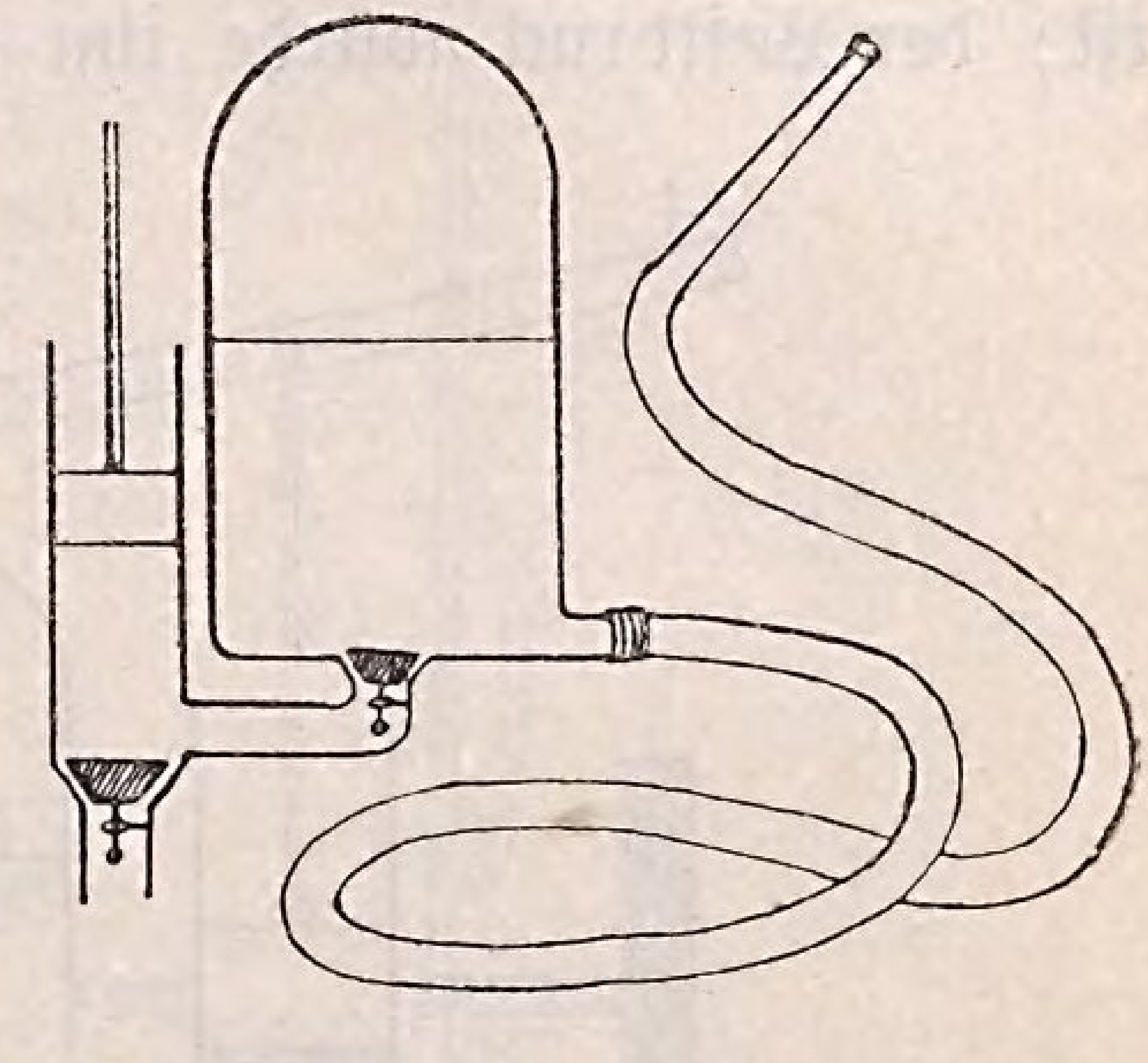


Fig. 65.

Wenn man durch fortgesetztes Pumpen immer wieder so viel Wasser in den Windkessel preßt, als herausspritzt, so erhält man einen gleichmäßigen Wasserstrahl, der stets nahezu gleich hoch und gleich weit geht und beständig andauert, oder kontinuierlich ist. Dieser Strahl springt auch in der Zeit, in welcher der Kolben in die Höhe geht, in der also kein Wasser in den Windkessel gepreßt wird, da in dieser Zeit das im Windkessel vorhandene Wasser durch die komprimierte Luft herausgedrückt wird; je geräumiger der Windkessel ist, desto gleichmäßiger ist der Strahl.

Solche Spritzen werden als Gartenspritzen, Handfeuerspritzen rc. vielfach verwendet.

Die Feuerspritze besteht aus zwei Druckpumpen, deren Kolbenstangen an den beiden Armen eines Hebels angebracht sind, so daß sie abwechselnd wirken; ihre Steigröhren führen in einen Windkessel, so daß, wenn gepumpt wird, das Wasser in den Windkessel dringt und die dort befindliche Luft zusammenpreßt; unten am Windkessel führt eine Röhre nach auswärts, an die ein Schlauch, der Steigschlauch, angeschraubt wird, an dessen Ende die Spritzenöffnung, das Mundstück, sich befindet. Aus ihr spritzt dann das Wasser heraus, getrieben durch den Überdruck der im Windkessel befindlichen Luft; auch hierbei ist der Strahl kontinuierlich und stets gleich hoch, wenn soviel Wasser hineingepumpt wird, als herausläuft, und der Strahl ist um so gleichmäßiger, je geräumiger der Windkessel ist.

Die ganze Spritze befindet sich in einem mit Blech ausgeschlagenen Kasten, in den das Wasser geschüttet wird, und von dem aus es durch kurze Saugröhren in die Pumpen gelangt.

Häufig sind beide Saugrohre verlängert, laufen in ein Rohr zusammen, und an dieses wird ein langer Saugschlauch ange-

schraubt, den man in das Wasser eines nahegelegenen Brunnens oder Flusses hinabhängen läßt. Durch das Pumpen wird dann das Wasser direkt aus dem Brunnen in die Stiefel gesaugt, und man hat nicht nötig, das Wasser zur Spritze zu tragen. Ein solcher Saugschlauch muß aber sehr fest sein; denn von außen drückt die Luft, während innen ein nahezu luftleerer Raum, also fast kein Druck ist; der Luftdruck würde ihn also zusammenquetschen, drosseln; man

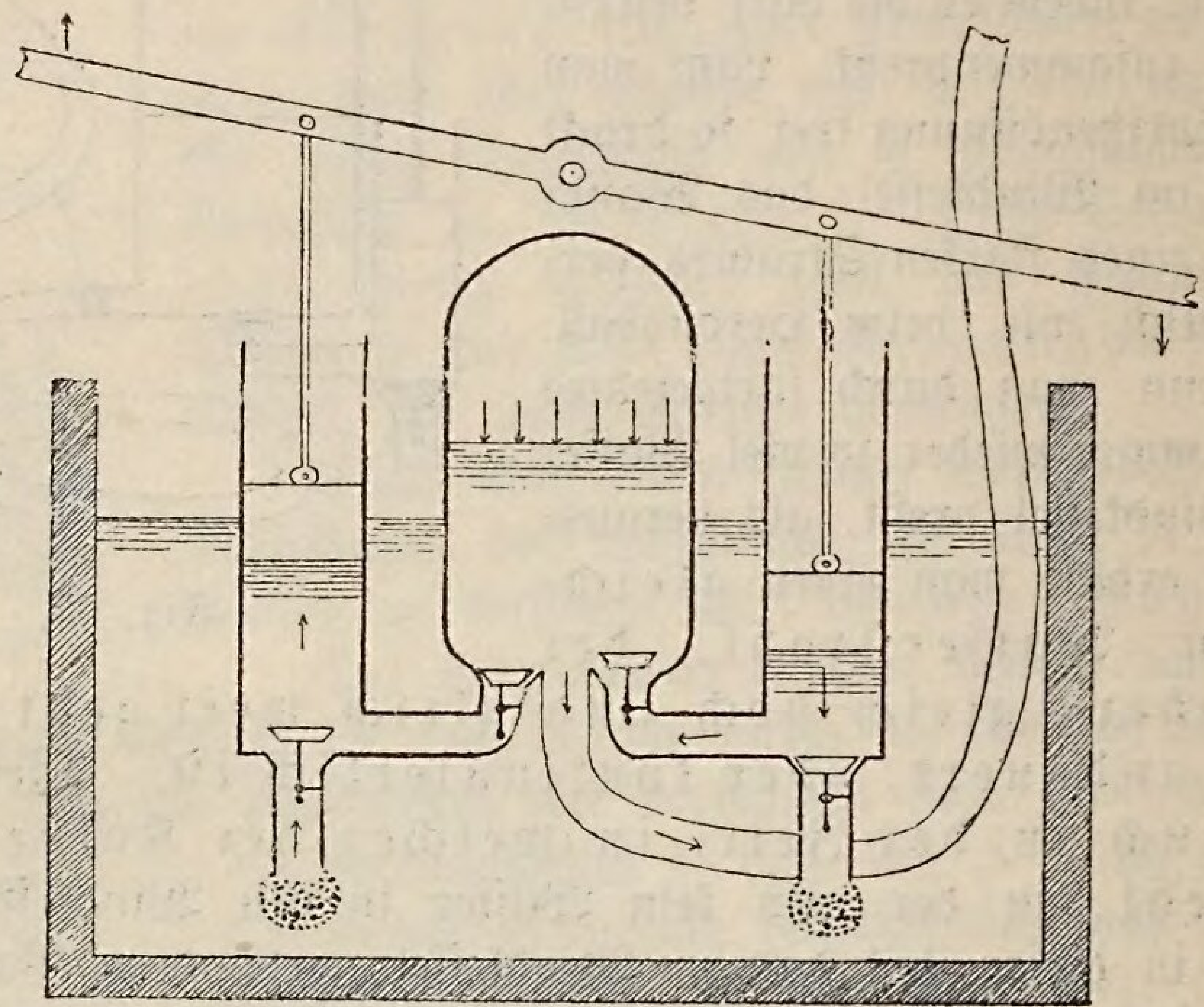


Fig. 66.

macht deshalb den Saugschlauch aus starken Eisenringen, die durch Kautschuck verbunden und dann mit starkem Segeltuch umwickelt sind. Der Steigschlauch dagegen, der durch den Seitendruck des darin befindlichen Wassers auseinander getrieben wird, besteht bloß aus starkem Segeltuch.
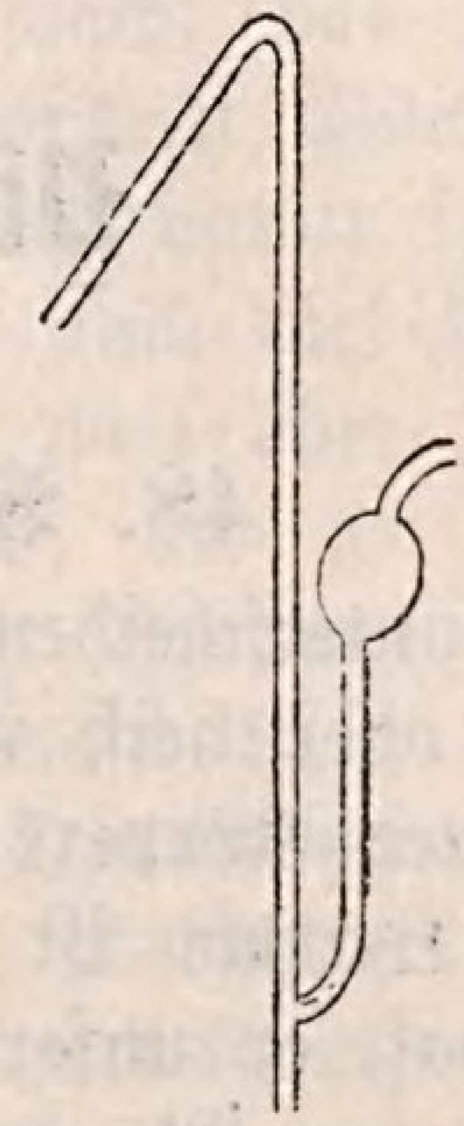
Wasserleitungsanlagen, welche kein Hochreservoir besitzen, ersetzen dieses durch mächtige Windkessel.

47. Die Heber.

Ein Heber ist ein in starkem Knie (\/) gebogenes Rohr aus Glas oder Blech, dessen Schenkel verschiedene Länge haben. Er dient dazu, eine Flüssigkeit aus einem höheren Gefäß in ein niedriger stehendes zu leiten, ohne das Gefäß neigen oder anzapfen zu müssen. Man taucht den Heber mit dem kürzeren Schenkel in die Flüssigkeit, so daß der längere Schenkel nach abwärts gerichtet ist, und saugt dann mit dem Munde am längeren Schenkel (Saugheber); dadurch entfernt man die Luft aus demselben, und die Flüssigkeit wird durch den äußeren Luftdruck in den Heber getrieben. Ist der Heber so angesaugt, also mit Flüssigkeit gefüllt, und gibt man das untere Ende des Hebers frei, so fließt die Flüssigkeit be=

ständig aus dem oberen Gefäß durch den Heber in das untere Gefäß; denn da im längeren Schenkel eine höhere Flüssigkeitssäule ist als im kürzeren, so übt diese einen stärkeren Zug aus, als die im kürzeren, deshalb kommt und bleibt die Flüssigkeit in Bewegung.

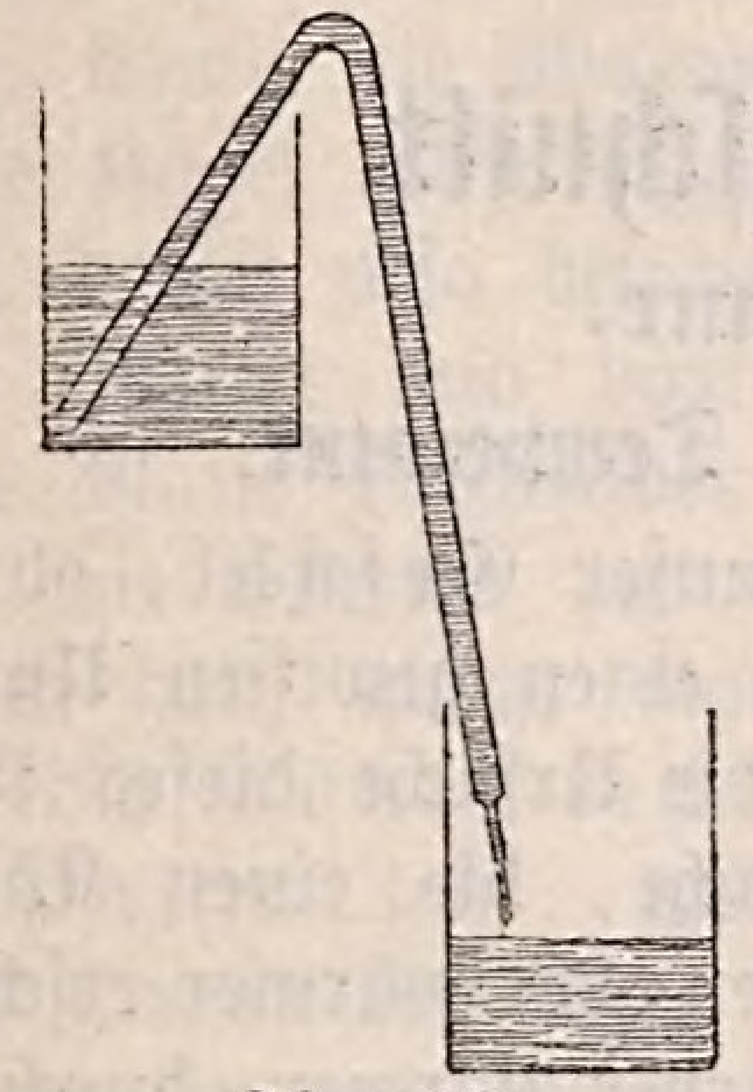

Fig. 67.


Fig. 68.

Ist eine Flüssigkeit abzufüllen, die man nicht gerne in den Mund bringt, weil sie giftig, ätzend oder ekelhaft ist, so benützt man den Giftheber, bei dem nahe am untern Ende des langen Schenkels eine Saugröhre nach aufwärts führt, die in der Mitte sich zu einer großen Kugel ausbaucht. Er wird angesaugt, indem man den langen Schenkel unten verschließt und nun an der Saugröhre mit dem Munde saugt; dadurch wird die Luft aus dem Heber entfernt, und er füllt sich mit Flüssigkeit, bevor solche in den Mund gelangen kann. Soll ein Heber weit sein (mehr als 1 *cm*), so daß die Flüssigkeit auch in großer Masse durch ihn fließt, so kann man ihn nicht mit dem Munde ansaugen; man füllt ihn, indem man beide Enden verschließt, dann durch einen am Knie oben angebrachten Trichter Flüssigkeit eingießt, bis er voll ist; man schließt dann diese Öffnung und öffnet zuerst den kurzen, dann den langen Schenkel.


Fig. 69.

Der Stechheber ist eine weite Glasröhre, die oben so eng ist, daß man sie mit dem Finger verschließen kann, und unten wie zu einer Spritze ausgezogen, in eine feine Öffnung ausläuft. Taucht man ihn in eine Flüssigkeit, wobei er oben offen ist, so füllt er sich, soweit er eingetaucht ist; schließt man oben und zieht ihn heraus, so kann die Flüssigkeit nicht herauslaufen, weil sie getragen wird durch den auf die untere Öffnung nach aufwärts wirkenden Druck der äußeren Luft. Es läuft beim Herausziehen wohl etwas Flüssigkeit heraus; dadurch dehnt sich aber die innere Luft aus und bekommt einen kleineren Druck, welcher eben gerade so groß wird, daß er in Verbindung mit dem Drucke der darin bleibenden Flüssigkeit gleich wird dem äußeren Drucke; noch dazu ist die untere Öffnung so eng,

daß Luft und Wasser sich nicht ausweichen können, also auch das Wasser auf diese Weise nicht herausfließen kann. Er wird benützt, um Proben einer Flüssigkeit z. B. Wein, Bier ꝛc. aus Fässern herauszunehmen, ohne sie unten anzuzapfen.

Vierter Abschnitt.

Die Wärme.

48. Wärmezustand, Temperatur.

Wir unterscheiden schon durch unser Gefühl, ob ein Körper kalt, warm oder heiß ist, finden also einen gewissen Unterschied im Zustande eines Körpers und nennen die Ursache dieses Unterschiedes Wärme. Wärme ist also die Ursache, die einen Körper derart verändert, daß er unserm Gefühl kälter oder wärmer erscheint; durch Hinzuführen von Wärme wird der Körper wärmer, durch Wegnahme von Wärme wird er kälter. **Der Zustand der Wärme, in dem ein Körper sich eben befindet, heißt seine Temperatur.** Zwei Körper haben gleiche Temperatur, wenn sie, mit einander in Berührung gebracht, ihre Temperatur nicht verändern; sie haben ungleiche Temperatur, wenn sie bei Berührung ihre Temperatur verändern, und zwar wird dabei der kältere Körper wärmer, seine Temperatur steigt, der wärmere wird kälter, seine Temperatur sinkt.

Unser Gefühl ist aber ein ziemlich unzuverlässiges Mittel zur Bestimmung der Temperatur, denn häufig erscheinen uns zwei gleich warme Körper verschieden warm, z. B. Eisen fühlt sich kälter an als Holz, wenn beide sehr kalt sind, dagegen wärmer als Holz, wenn beide sehr warm sind; ja sogar ein und derselbe Körper kann uns verschieden warm erscheinen; taucht man nämlich zugleich die rechte Hand in sehr warmes, die linke in kaltes Wasser, und dann beide zugleich in ein und dasselbe lauwarme Wasser, so findet es die rechte Hand kalt, die linke warm.

49. Die Thermometer.

Ein Apparat, durch den man die Temperatur eines Körpers messen kann, heißt ein Thermometer. Das bekannteste, zugleich einfachste und beste ist das Quecksilberthermometer; es beruht darauf, daß das Quecksilber, wie jeder andere Körper, sich ausdehnt, wenn es wärmer wird, und sich zusammenzieht, kleiner wird, wenn es kälter wird. Es besteht aus einer engen Glasröhre, an die unten eine Kugel angeblasen ist; die Kugel und ein Teil der Röhre sind mit Quecksilber gefüllt. Bei der Erwärmung dehnt es sich aus, hat in der Kugel nicht mehr Platz und steigt deshalb in der Röhre; beim Abkühlen zieht es sich zusammen, sinkt also in der Röhre, indem es wieder in die Kugel

zurückgeht. **Durch den Stand des Quecksilbers in der Röhre wird die Temperatur bestimmt.**

Ein gutes Thermometer muß folgende Eigenschaften haben. Das Glas der Kugel muß sehr dünn sein, damit die Wärme leicht in das Quecksilber eindringen kann; man macht das Gefäß häufig länglich, damit die Wärme bei einer größeren Fläche eindringen kann. Die Kugel sollte eigentlich groß sein, damit sie viel Quecksilber faßt, damit also bei der Erwärmung auch viel Quecksilber in die Röhre eintritt und dort stark steigt; weil aber eine große Masse Quecksilber lange braucht, bis sie vollständig die Wärme des sie umgebenden Körpers angenommen hat, macht man die Kugel meist klein und dafür die Röhre recht eng. Das Quecksilber muß ganz rein sein, weil sonst beim Abkühlen häufig das Quecksilber nicht in die Kugel zurückgeht, sondern ganz in der Röhre stehen bleibt, indem der Quecksilberfaden zerreißt. Die Kugel und Röhre müssen luftleer sein; man erreicht dies wie beim Barometer durch Auskochen. Ist sie ausgekocht, so erwärmt man die Kugel bis zu dem Grade, bei dem das Quecksilber die ganze Röhre ausfüllen soll, und schmilzt dann die Röhre oben zu, so daß beim Sinken des Quecksilbers in der Röhre ein luftleerer Raum entsteht.

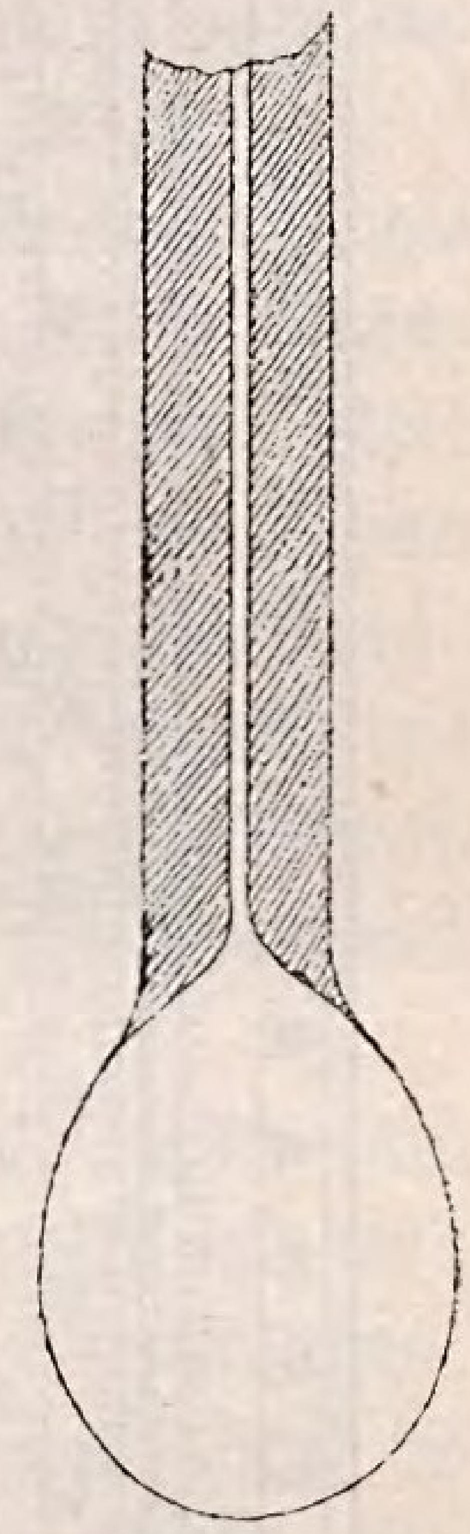


Fig. 70.

Die Röhre muß überall gleich weit sein oder dasselbe Kaliber haben, damit das Quecksilber bei gleicher Ausdehnung auch um gleich viel in der Röhre steigt. Um dies zu untersuchen, saugt man einen kurzen Quecksilberfaden in die Röhre, mißt seine Länge, verschiebt ihn, bis er dort anfängt, wo er zuerst aufgehört hatte, mißt seine Länge, und fährt so fort durch die ganze Röhre; diese Längen müssen alle einander gleich sein; das ist aber nie der Fall. Sind die Abweichungen bedeutend, so verwirft man die Röhre; sind sie nur unbeträchtlich, so benützt man die Röhre, und kann mittels der gefundenen Abweichungen die Angaben des Thermometers korrigieren. Nur die besten Thermometer werden auf solche Weise kalibriert (Normalthermometer), bei guten hilft man auf andere Weise, wie wir sehen werden, bei schlechten kümmert man sich nicht um die durch ungleiches Kaliber entstehenden Fehler.

Zur Einteilung der Skala des Thermometers bestimmt man zunächst die zwei Fixpunkte. Man steckt das Thermometer in gestoßenes Eis, besser in frisch gefallenen Schnee, den man in ein mäßig warmes Zimmer gebracht hat, so daß der Schnee in langsamem Schmelzen begriffen ist. Es findet sich nämlich, daß, so lange die Kugel von schmelzendem Schnee umgeben ist, das Quecksilber in der Röhre stets und beständig auf dem=

selben Punkte steht, gleichgültig, wie warm das Zimmer ist. Diesen Punkt bezeichnet man auf der Skala mit 0 und nennt ihn den **Nullpunkt, Eis- oder Gefrier- oder Schmelzpunkt.**

Man hält das Thermometer ferner in kochendes Wasser, besser in den Dampf kochenden Wassers, bezeichnet den Stand des Quecksilbers auf der Skala und nennt diesen Punkt den **Siedepunkt.** Es findet sich, daß hiebei das Quecksilber auch stets und beständig auf derselben Stelle steht, gleichgültig wie stark das Wasser kocht; jedoch werden wir hierüber später noch genaueres erfahren. Diese zwei Fixpunkte sind also stets leicht und sicher zu bestimmen.

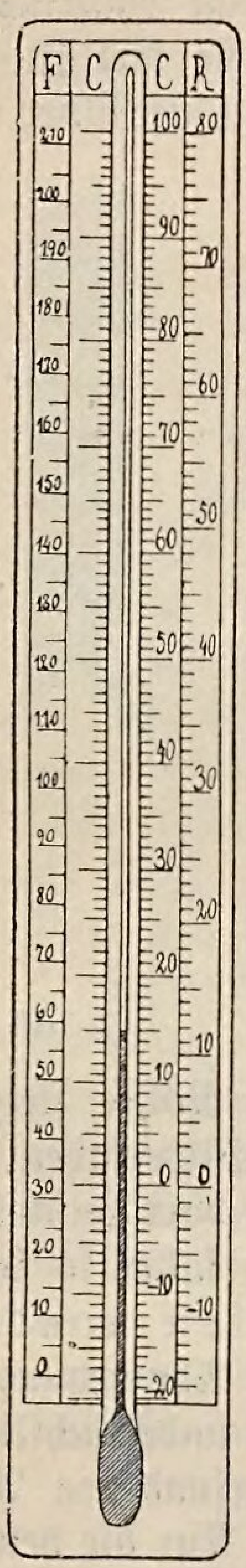


Fig. 71.

Den Abstand zwischen beiden Punkten teilt man, vorausgesetzt, daß die Röhre überall gleich weit ist, in 100 gleiche Teile oder Grade, so daß der Gefrierpunkt mit 0°, der Siedepunkt mit 100° bezeichnet ist, nennt sie Grade nach **Celsius** oder Centesimalgrade, trägt eben so große Grade über 100 an, indem man einfach weiterzählt, und unter 0, indem man sie dort mit — bezeichnet und Kältegrade nennt.

Diese Einteilung ist jetzt fast allgemein gebräuchlich. Zur Angabe der Temperatur der Luft und des Wassers (an Badeplätzen) benützt man häufig noch die ältere Einteilung nach **Réaumur,** nach welcher der Raum zwischen beiden Fixpunkten in 80 Teile geteilt ist, also auf dem Siedepunkt 80° steht: es sind demnach 100° C = 80° R, 5° C = 4° R, 30° C = 24° R ꝛc.

In England und Nordamerika bedient man sich meist noch der Einteilung nach **Fahrenheit.** Man teilt den Abstand beider Fixpunkte in 180 gleiche Teile, trägt noch 32 solche Teile vom Gefrierpunkt nach abwärts an und bezeichnet diesen Punkt mit 0°, so daß am Gefrierpunkt 32°, am Siedepunkt 212° steht; es sind also 100° C = 180° + 32° F, 5° C = 9° + 32° F, 30° C = 54° + 32° F = 86° F, 100° F = $(100-32) \cdot {}^5/_9$ = 37,77° C (Bluttemperatur des Menschen.)

Die Akademie von Florenz stellte seit 1657 die ersten wirklichen Thermometer her, die mit Wasser oder Weingeist gefüllt waren, aber noch keine Fixpunkte hatten. Erst Renaldini schlug 1694 den Schmelz- und Siedepunkt als Fixpunkt vor. Die ersten vergleichbaren Thermometer machte Fahrenheit († 1736) und benutzte zuerst Weingeist, dann Quecksilber; als Fixpunkte nahm er eine Kältemischung für 0° und die Temperatur der Mundhöhle 100°.

Wenn die Thermometerröhre nicht überall gleich weit ist, und man gleichwohl den Abstand der Fixpunkte in gleiche Teile teilt, so sind die Angaben des Thermometers ungenau, was oft einen Grad ausmacht. Man vergleicht dieses Thermometer etwa von 10 zu 10° mit den Angaben des Normalthermometers, erfährt dadurch die Abweichungen, stellt diese in eine Tabelle zusammen und kann damit die Angaben dieses Thermometers korrigieren; weiß man etwa, daß es zwischen 10 und 20° um 0,4° zu tief steht, und zeigt es eine Temperatur von 16,3°, so schließt man, daß die wirkliche Temperatur 16,7° ist.

Bei jedem Thermometer verändert sich mit der Zeit die Lage des 0 Punktes dadurch, daß durch den äußeren Luftdruck die Glaskugel etwas zusammengedrückt wird. Man muß deshalb von Zeit zu Zeit **die Lage des Nullpunktes kontrollieren,** indem man das Thermometer in schmelzendes Eis steckt. (Das Jenaer Normalthermometerglas ist frei von diesem Übelstande.) Nur wenn die Angaben eines Thermometers auf diese Art korrigiert werden, sind sie zuverlässig und brauchbar; gewöhnliche Thermometer zeigen meist sehr unregelmäßig und oft bis 2° unrichtig.

Das Quecksilberthermometer kann bloß zwischen — 39° und 357° benützt werden; denn bei — 39° gefriert das Quecksilber und bei 357,2° kocht es und entwickelt Dämpfe, die die Kugel zersprengen. Es ist aber keineswegs jedes Thermometer so eingerichtet, daß es wirklich von — 39° bis 357° reicht, sondern meistens umfaßt das Thermometer nur diejenigen Grade, innerhalb deren sich erfahrungsgemäß die Temperatur desjenigen Körpers bewegt, dessen Temperatur gemessen werden soll. Ein Thermometer, das die Wärme der Luft angeben soll, geht von — 30 bis + 50°; soll die Temperatur des kochenden Wassers gemessen werden, so geht es von 80° bis 102°; ein anderes, das nur zur Bestimmung höherer Temperaturen dienen soll, geht etwa von 100—200°, oder von 100—300° ꝛc. So hat man für verschiedene Zwecke verschiedene Thermometer, insbesonders um die Röhre ziemlich kurz machen zu können, ohne daß die Grade zu klein werden. Will man auf $^1/_{10}{}^0$ genau ablesen, so muß 1° nahezu eine Länge von 2 *mm* haben; bei kochendem Wasser will man oft $^1/_{100}{}^0$ ablesen, also muß 1° nahezu 2 *cm* lang sein.

Für Temperaturen unter — 30° benützt man das Weingeistthermometer, das wie ein Quecksilberthermometer eingerichtet, aber mit wasserfreiem Weingeist, absolutem Alkohol, gefüllt ist; derselbe gefriert nicht, sondern wird bei sehr niedriger Temperatur nur etwas dickflüssig; es wird, so weit möglich, durch Vergleich mit einem Quecksilberthermometer in Grade geteilt, und weiter unten werden eben so große Grade angetragen, jedoch sind diese Angaben ziemlich unzuverlässig. Für Temperaturen über 350° hat man verschiedene andere Apparate von geringer Zuverlässigkeit (Pyrometer).

Um zu erfahren, welches die höchste Temperatur war, die das Thermometer im Laufe einer gewissen Zeit angenommen hat, benützt man das Maximumthermometer. Es ist ein gewöhnliches Quecksilberthermometer, jedoch mit etwas weiter Röhre und etwas großer Kugel; in der Röhre befindet sich über dem Quecksilber ein kleines Eisenstäbchen, Zeiger oder Index genannt. Steigt das Quecksilber, und ist die Röhre horizontal gestellt, so schiebt es den Index vor sich her; fällt es wieder, so läßt es den Index an der vordersten Stelle liegen, woran man die höchste Temperatur erkennen kann. Durch Erheben des Rohres rutscht der Index dann wieder bis zum Quecksilberfaden zurück. Mittels derselben kann man also

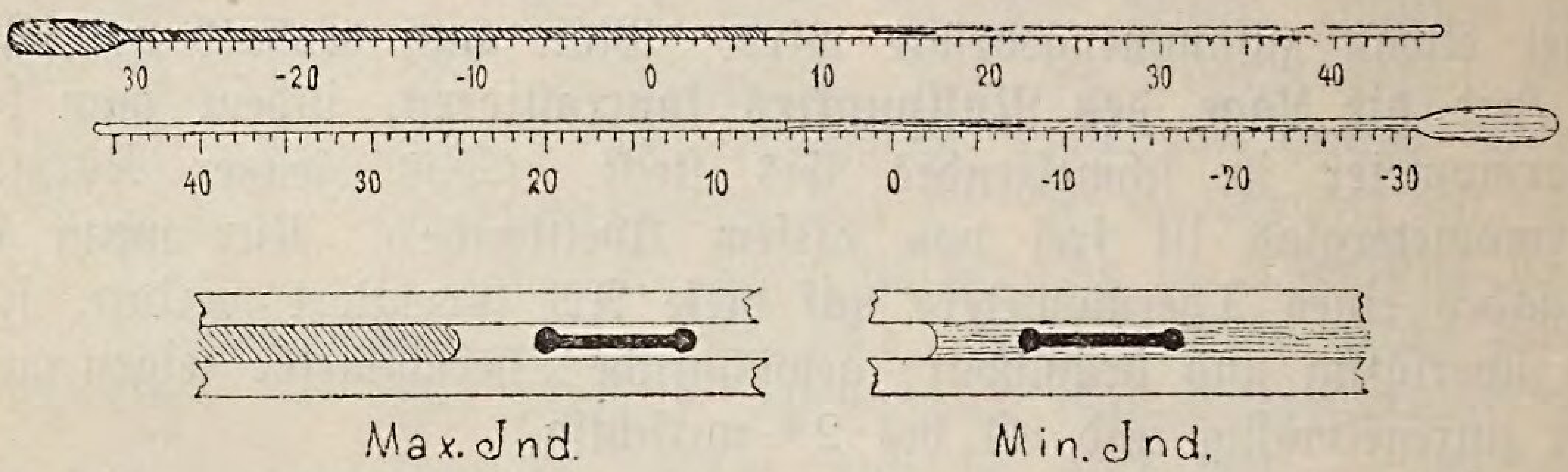


Fig. 72.

ersehen, wie hoch die Temperatur etwa im Laufe eines Tages gestiegen ist.

Eine andere Einrichtung ist folgende: Man schmilzt in den untern Teil der Röhre einen kleinen Glassplitter ein; dieser hindert nicht das Steigen des Quecksilbers beim Erwärmen, aber bei der Abkühlung reißt der Quecksilberfaden gerade am Splitter ab, bleibt in der Röhre und gibt so das Maximum der Temperatur an; durch Schwingen des Thermometers tritt dann das Quecksilber wieder in die Kugel zurück. Dies Maximumthermometer kann in jeder Lage (nicht bloß in horizontaler) benützt werden, und wird deshalb vom Arzte benützt, um die Bluttemperatur des Kranken zu bestimmen; man bringt die Kugel in die Mund- oder Achselhöhle des Kranken, läßt sie dort einige Zeit, zieht sie heraus und kann nun bequem die Temperatur ablesen; solche Thermometer gehen von 32° bis 44°.

Das Minimumthermometer dient dazu, die niedrigste Temperatur zu erfahren, welche im Verlauf einer gewissen Zeit eingetreten ist. Es ist ein gewöhnliches Weingeistthermometer: im Weingeist der Röhre befindet sich ein kleines Glasstäbchen, Index. Neigt man das Rohr, so läuft der Index bis an das vordere Ende des Weingeistfadens, ist aber nicht im stande, die Grenzfläche des Weingeistes zu durchbrechen und so aus dem Weingeist herauszutreten. Sinkt die Temperatur, so nimmt bei horizontal gelegtem Rohre der zurückweichende Weingeist vermöge der Spannung seiner Oberfläche den Index mit zurück; steigt die Temperatur, so fließt der vor-

dringende Weingeist am Glasstäbchen vorbei, ohne es mitzunehmen; der Index liegt also an der hintersten Stelle, bis zu welcher der Weingeist zurückgegangen war, gibt also die niedrigste Temperatur an, die während einer gewissen Zeit, z. B. während der Nacht, eingetreten war.

Eine Zusammenstellung eines Maximum- und Minimumthermometers nennt man auch ein Thermograph.

50. Ausdehnung fester Körper durch die Wärme.

Jeder Körper dehnt sich bei Erwärmung aus. Da die Größe dieser Ausdehnung bei festen Körpern ziemlich gering ist, so bedient man sich, um sie sichtbar und meßbar zu machen, des Apparates von

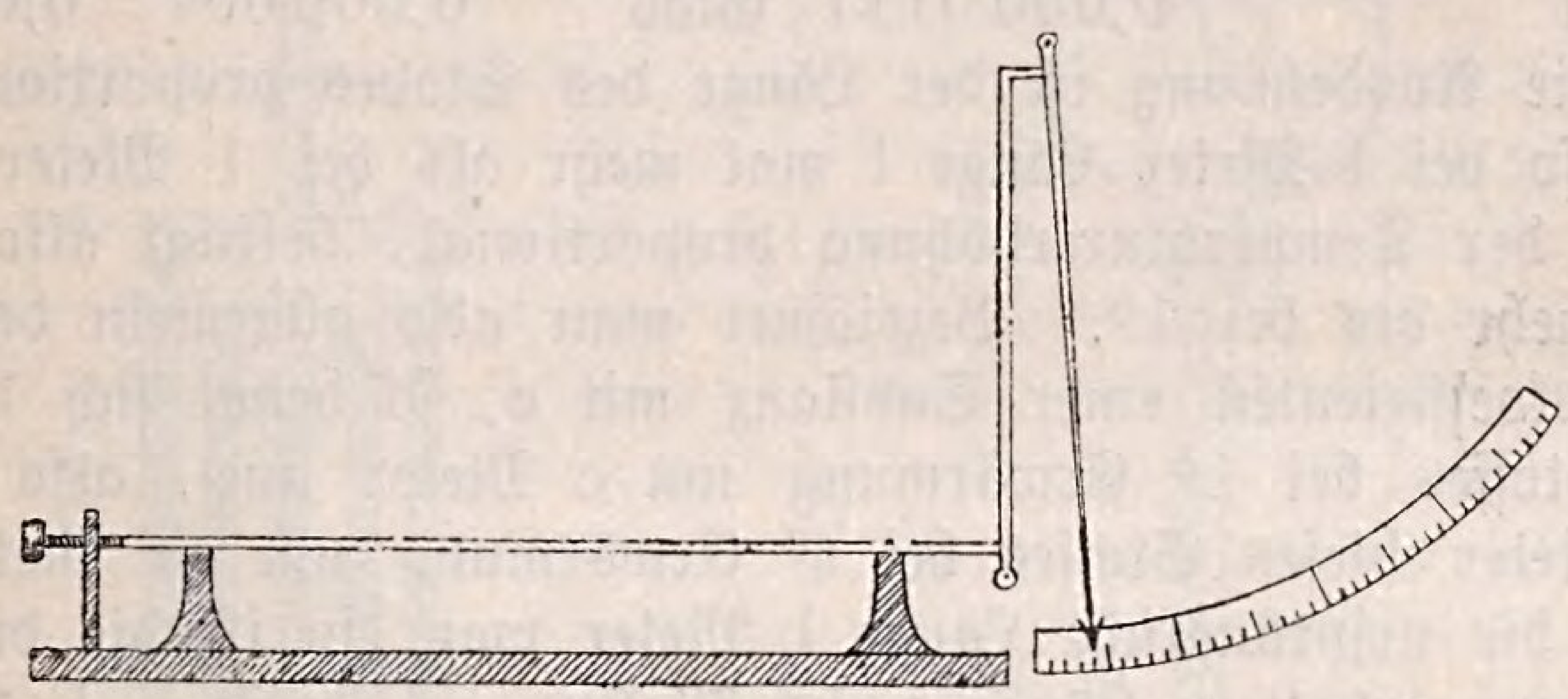


Fig. 73.

Muschenbrook. Ein Stab aus dem Material, dessen Ausdehnung man untersuchen will, z. B. ein Eisenstab, wird horizontal auf zwei gabelförmige Träger gelegt; mit dem einen Ende berührt er eine Stellschraube, mit dem andern drückt er gegen einen beweglichen Stift (Druckhebel), und zwar sehr nahe an dessen Drehpunkt. Wenn der Eisenstab durch die Erwärmung sich ein wenig ausdehnt, also das Ende desselben nur eine kleine Bewegung macht, so macht das Ende des Stiftes schon eine vielmal (etwa 20 mal) größere Bewegung. Das Ende des Stiftes drückt nun gegen einen beweglichen Zeiger, und zwar auch wieder sehr nahe am Drehpunkte, so daß die Zeigerspitze wieder eine vielmal größere Bewegung macht (etwa 10 mal); sie macht also eine 200 mal größere Bewegung als das Ende des Eisenstabes, so daß dieselbe sichtbar, und wenn das Zeigerende über einem geteilten Kreise spielt, auch meßbar ist.

Unter den festen Körpern dehnen sich die Metalle am stärksten aus, und unter ihnen besonders Zink; ein 1 *m* langer Zinkstab dehnt sich bei Erwärmung um 100° um 3 *mm*, ein Eisenstab bloß um ca. 1 *mm* aus.

Unter linearem Ausdehnungskoeffizienten oder spezifischer Längenausdehnung versteht man die Länge (in Bruchteilen des Meters), um welche sich ein Stab von 1 *m* Länge ausdehnt

bei einer Erwärmung von 1°, oder auch das Verhältnis der Ausdehnung bei 1° zur ursprünglichen Länge. Derselbe ist für

Platin	0,000 009	Messing	0,000 0187
Eisen	0,000 0116—126	Messingdraht	0,000 0193
Gold	0,000 014	Hartlot (1 Znk, 2 Ku.)	0,000 0126
Kupfer	0,000 017	Zinn	0,000 0194—248
Silber	0,000 020		
Blei	0,000 0284	Cement	0,000 0143
Zink	0,000 0294—0,000 0311	Granit	0,000 00868
Stahl ungehärtet	0,000 0108	Holz (Tannen)	0,000 00352
„ gehärtet	0,000 0137	Marmor	0,000 00426
Gußstahl	0,000 0122	Mauerziegel	0,000 0055
Gußeisen	0,000 0111	Glas	0,000 007—0,000 009

Die Ausdehnung ist der Länge des Stabes proportional, beträgt also bei l Meter Länge l mal mehr als bei 1 Meter Länge, und ist der Temperaturerhöhung proportional, beträgt also bei t° t mal mehr als bei 1°. Bezeichnet man also allgemein den Ausdehnungskoeffizienten einer Substanz mit c, so dehnt sich 1 Meter dieses Stoffes bei 1° Erwärmung um c Meter aus, also dehnen sich l Meter dieses Stoffes bei t° Erwärmung um clt Meter aus, und da die ursprüngliche Länge l Meter war, so ist die durch die Ausdehnung erhaltene Länge dieses Stabes $= l + clt = l\,(1 + ct)$.

Wie aus der Tabelle ersichtlich ist, dehnen sich die verschiedenen Körper in sehr verschiedenem Grade aus, Glas 4 mal, Eisen 3 mal weniger als Zink. Bei höheren Temperaturen dehnen sich die Körper im allgemeinen etwas stärker aus als bei niedrigen; die angegebenen Koeffizienten gelten nur zwischen 0° und 100°, und auch da nicht ganz gleichmäßig.

Wenn auch die Größe der Ausdehnung bei festen Körpern nicht beträchtlich ist, so ist doch die Kraft, mit welcher sie sich ausdehnen, eine ungemein große, so groß, daß ihr für gewöhnlich kein Widerstand unüberwindlich ist. Ein eiserner Tragbalken, zwischen zwei Mauern angebracht drückt dieselben durch, wenn er sich ausdehnt; man läßt deshalb an seinen Enden einen Spielraum. Die Schienen der Eisenbahn werden nicht ganz an einander gestoßen, damit sie sich ausdehnen können; wäre kein Spielraum da, so würden sie sich biegen und sogar die Schwellen, an denen sie befestigt sind, aus dem Boden heben. Daß der Kitt, der zwei Gegenstände verbindet, so selten hält, kommt davon her, daß Kitt und Gegenstand sich verschiedenartig ausdehnen, also entweder eine Pressung oder Zerreißung des Kittes entsteht.

Bei Uhren ist die Ausdehnung der Pendelstange durch die Wärme sehr störend für den gleichmäßigen Gang; denn je länger die Pendelstange wird, desto langsamer geht die Uhr; eine Turmuhr, die jedem Temperaturwechsel ausgesetzt ist, würde also im Sommer

nach-, im Winter vorgehen. Diesem Mißstande hilft man ab durch das Kompensations- oder Rostpendel, daß auf der ungleichmäßigen Ausdehnung der Metalle beruht. (Graham 1715.) Man macht das Pendel oben aus einer kurzen Eisenstange a b, die bei b einen Querbalken trägt; von diesem führen zwei Eisenstangen nach abwärts, dann zwei Zinkstangen nach aufwärts und von da führt eine Eisenstange nach abwärts bis zur Linse. Durch die Erwärmung geht die Linse nach abwärts infolge der Ausdehnung der

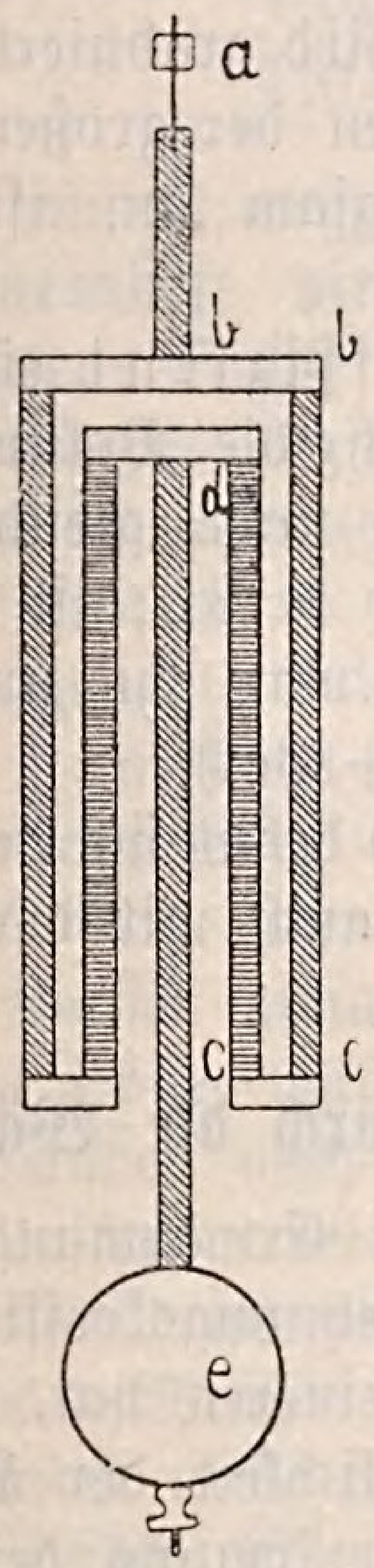


Fig. 74.

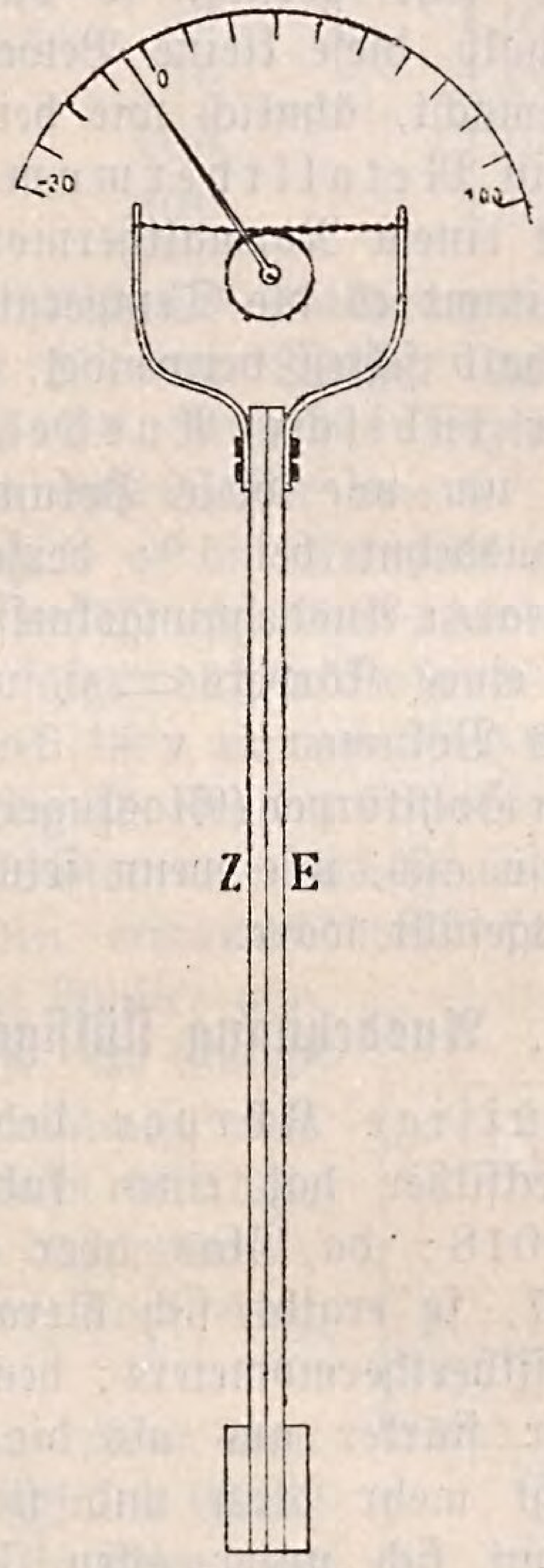


Fig. 75.

Eisenstäbe ab, bc, de, aber nach aufwärts durch die Ausdehnung des Zinkstabes cd; sind beide Ausdehnungen gleich groß, so bleibt die Linse e trotz der Erwärmung gleich weit von a entfernt, also die Pendellänge gleich groß. Da sich Zink dreimal stärker ausdehnt als Eisen, so muß hiebei die Zinkstange cd dreimal kleiner sein, als die Summe der Eisenstäbe ab + bc + de.

Statt dieses umständlichen Apparates benützt man oft eine Pendelstange aus scharf getrocknetem und dann gut gefirnißtem Holz, da dasselbe sich nur sehr wenig ausdehnt und durch den Firnis vor dem Feuchtwerden geschützt ist.

Auf der ungleichen Ausdehnung der Metalle beruht auch das Metallthermometer. Werden nämlich zwei Streifen von Metallen, die sich sehr ungleich ausdehnen, z. B. Eisen und Zink, der ganzen Länge nach auf einander gelötet, und dieser Stab, Thermostreifen, mit dem einen Ende festgeklemmt, so biegt er sich bei Erwärmung nach der Seite des Eisens, so daß das Zink außen ist, da sich Zink stärker ausdehnt als Eisen; bei Abkühlung krümmt er sich nach der anderen Seite. Jedoch sind diese Bewegungen des Stabendes sehr gering, so daß man sie kaum sehen könnte; es wird deshalb diese kleine Bewegung durch irgend eine Vorrichtung größer gemacht, ähnlich wie bei dem Metallbarometer und man erhält so ein Metallthermometer. Es wird graduiert durch Vergleich mit einem Normalthermometer. Wegen der großen Masse des Stabes nimmt es die Temperatur nur langsam an, ist träge und wird deshalb selten verwendet.

Der kubische Ausdehnungskoeffizient eines Stoffes gibt an, um wie viele Volumeinheiten sich die Volumeinheit des Stoffes ausdehnt bei 1^0; derselbe ist sehr nahe gleich dem dreifachen linearen Ausdehnungskoeffizienten, also $= 3c$; ist deshalb das Volumen eines Körpers $= v$, und erwärmt man ihn um t^0, so ist sein neues Volumen $= v + 3cvt = v(1 + 3ct)$.

Ein Hohlkörper (Glaskugel, Blechkörper) dehnt sich dem Volumen nach ebenso aus, wie wenn sein Hohlraum auch mit der Masse der Hülle ausgefüllt wäre.

51. Ausdehnung flüssiger Körper durch die Wärme.

Flüssige Körper dehnen sich bei Erwärmung auch aus. Das Quecksilber hat einen kubischen Ausdehnungskoeffizienten von von 0,00018; da Glas aber einen viel kleineren hat, nämlich ca. 0,000027, so ergibt sich hieraus die Möglichkeit der Konstruktion des Quecksilberthermometers; denn bei der Erwärmung dehnt sich das Quecksilber stärker aus als die Glaskugel, hat also in der Glaskugel nicht mehr Platz und steigt deshalb in der Röhre. Quecksilber dehnt sich unter allen Flüssigkeiten am gleichmäßigsten aus, die andern Flüssigkeiten dehnen sich aber so unregelmäßig aus, daß man ein einfaches Gesetz nicht angeben kann: der Ausdehnungskoeffizient wächst bei steigender Temperatur beträchtlich.

Wasser zeigt eine merkwürdige Ausnahme; es zieht sich von 0^0 an zusammen bis 4^0 C, hat bei 4^0 C seine größte Dichte und dehnt sich von da an wieder aus (Rumford). Wasser eignet sich demnach nicht zum Füllen von Thermometern. Enthält das Wasser andere Stoffe aufgelöst, so zeigt es ein anderes Verhalten; Meerwasser, das 3,7 % Salz enthält, hat die größte Dichte bei ca. -2^0, gefriert bei -2^0 bis $-2{,}4^0$.

Dieselbe Unregelmäßigkeit in der Ausdehnung findet auch bei

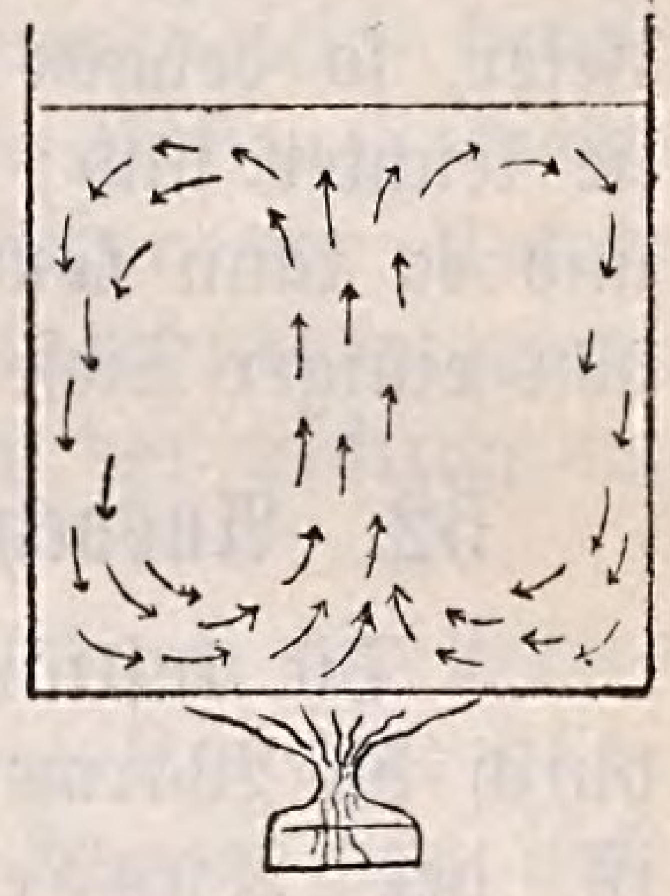
andern Körpern in der Nähe des Schmelzpunktes statt, z. B. beim Quecksilber. Da aber das Quecksilber im Thermometer bloß für Temperaturen benützt wird, die vom Gefrierpunkte desselben ziemlich weit entfernt sind, so hat das wenig Einfluß.

Ein *cdm* Wasser von 4° C hat folgende Volumina:

Temp. C°	*cdm*	Temp. C°	*cdm*
0	1,000 136	60	1,016 954
10	1,000 257	70	1,022 384
20	1,001 732	80	1,029 003
30	1,004 234	90	1,035 829
40	1,007 627	100	1,043 116
50	1,011 877	200	1,058 99

Man nimmt wegen dieser beträchtlichen Ausdehnung des Wassers als **Masseneinheit die Masse von 1 *ccm* Wasser im Zustand seiner größten Dichte also bei 4° C.** Auch die spezifischen Gewichte der Körper beziehen sich alle auf Wasser von 4°. Da sich Wasser von 4° an ausdehnt, so erhält es ein kleineres sp. G., so ist bei 100° sein sp. G. = 0,9586, 1 *l* Wasser von 100° wiegt um 41,4 *g* weniger als 1 *kg*. Daraus folgt, daß warmes Wasser, wenn es von kaltem umgeben ist, einen Auftrieb bekommt, infolgedessen es in die Höhe zu steigen bestrebt ist.

Wenn man einen Topf mit Wasser auf das Feuer stellt, so wird das Wasser zunächst am Boden erwärmt, wird leichter und steigt in die Höhe, während das kalte Wasser von den Seitenwänden nach abwärts sinkt. Es kommt also das Wasser hiebei in einen Kreislauf, eine Circulation, welche wesentlich dazu beiträgt, daß sich das Wasser gleichmäßig durchwärmt; ähnliches findet nicht statt, wenn der Topf etwa mit Sand gefüllt ist.


Fig. 76.

Ähnlich ist folgende Erscheinung: wenn man eine im Viereck gebogene mit Wasser gefüllte Glasröhre an einem untern Ecke erwärmt, so steigt das erwärmte Wasser wegen seiner größeren Leichtigkeit aufwärts, während das kältere im andern Teile der Röhre herabsinkt und so auch an die Erwärmungsstelle kommt; das Wasser kommt hiebei auch in eine Circulation, und bleibt in Circulation; denn stets wird das Wasser an der Erwärmungsstelle wärmer als das in den andern Teilen befindliche, und kühlt sich dann auf seinem Wege wieder ab. Auf solcher Circulation beruht die Wasserheizung. Im untersten Stock des Gebäudes oder in einem Nebengebäude befindet sich ein großer, starkwandiger, ganz verschlossener Kessel, gefüllt mit Wasser, das durch eine Feuerung erhitzt wird. Von seinem oberen Teile führt eine Röhre bis ins oberste Stockwerk,

biegt sich heberförmig um und taucht in das in einem geräumigen Kupferblechkasten (Wasserofen) befindliche Wasser. Dieser Behälter ist oben offen, damit das Wasser sich bei der Erwärmung ausdehnen kann. Aus diesem Behälter führt unten eine Röhre heraus, die alle zu erwärmenden Räume durchzieht, meist in mehreren Windungen, und dann in den unteren Teil des Kessels mündet. Wird nun das Wasser im Kessel erhitzt, so steigt es in der aufwärts führenden Röhre in die Höhe, und sinkt vom Behälter durch die abwärts führenden Röhren wieder in den Kessel zurück. Da es auf diesem Wege sich etwas abkühlt, so enthält die aufsteigende Röhre stets heißeres Wasser als die abwärtsführende, folglich bleibt das Wasser beständig in Circulation derart, daß das heiße Wasser aufsteigt, das kältere herabsinkt.

Da das Wasser nicht mehr als 100° bekommen kann, so wendet man diese Art von Heizung dann an, wenn gewöhnliche Öfen schädlich oder gefährlich werden könnten, z. B. in Gewächshäusern, auf Schiffen, in Fabriken, in denen Pulver, Papier, Baumwolle, Tabak oder ähnliche Stoffe verarbeitet oder getrocknet werden sollen oder auch, um Flüssigkeiten zu erwärmen, die man nicht gerne dem gewöhnlichen Feuer aussetzt.

Wird Wasser vorzugsweise von oben abgekühlt, so geht die Circulation in umgekehrter Richtung vor sich: die kälteren, also schwereren Teilchen sinken zu Boden, die wärmeren, leichteren steigen nach aufwärts. Dies tritt ein, wenn ein ruhiger See sich abkühlt; ist die Temperatur aber bis 4° gesunken und sinkt sie oben noch tiefer, so dehnen sich die oberen Schichten aus und bleiben oben, da sie leichter sind; die Kälte dringt daher nur langsam nach abwärts, und es kann kommen, daß sich oben eine Eisdecke bildet, während von einiger Tiefe an eine gleichmäßige Temperatur von 4° herrscht.

52. Ausdehnung luftförmiger Körper durch die Wärme.

Die luftförmigen Körper unterscheiden sich in der Ausdehnung durch die Wärme wesentlich von den festen und flüssigen; denn erstens ist der Ausdehnungskoeffizient bei allen Luftarten nahezu gleich groß (Dalton); dann ist diese Ausdehnung sehr beträchtlich, nämlich 0,00367 für 1°, und schließlich ist sie nahezu gleichförmig. 1 *l* Luft von 0° dehnt sich also, wenn man ihn um 1° erwärmt, um 0,00367 *l* aus, bis 100° um 0,367, bis 200° um 0,734 *l*, bis 273° um 1 *l*, ist also doppelt so groß geworden, und wird für je weitere 273° wieder um 1 *l* größer.

Bezeichnet man das Volumen der Luft bei 0° mit v_0, den Ausdehnungskoeffizienten mit $k = 0,00367$ und die Anzahl der Grade mit t_1, so ist die Ausdehnung $= v_0 k t_1$, also das neue, vergrößerte Volumen v_1:

$$v_1 = v_0 + v_0 k t_1 = v_0 (1 + k t_1).$$

Mit dem Volumen der Luft ändert sich ihr spezifisches Gewicht. Das sp. G. der Gase bezieht sich stets auf 0° und das der Luft beträgt 0,00129. Da bei Erwärmung auf t_1^0 das Volumen der Luft $(1 + kt_1)$ mal größer geworden ist, so ist ihre Dichtigkeit und auch ihr sp. G. $(1 + kt_1)$ mal kleiner geworden, folglich ist das sp. G. s_1:

$$s_1 = \frac{0,00129}{1 + kt_1}.$$

Hat man v_1 Liter Gas vom sp. G. s (s bei 0°) einer Temperatur von t_1^0 und einem Druck (Barometerstand) von b *mm* Quecksilber, so ist dessen Gewicht:

$$\text{Gewicht} = \frac{v_1 \cdot s \cdot 0,00129 \cdot b}{(1 + kt_1) \quad 760}\ kg.$$

Warme Luft, von kalter umgeben, hat wegen ihres geringeren sp. G. das Bestreben, in die Höhe zu steigen; so sehen wir die durch das Feuer erwärmte Luft aufsteigen und die Rußteilchen (Rauch) mit sich emporführen; die Luft über dem geheizten Ofen steigt in die Höhe. Ein Kamin dient nicht bloß dazu, dem Rauche einen Abzug zu verschaffen, sondern insbesondere dazu, einen Luftzug hervorzubringen, durch welchen das Brennen unterhalten wird. Die im Kamin befindliche warme Luft ist bestrebt in die Höhe zu steigen, und dafür strömt frische Luft unten durch die Öffnungen des Rostes herein und unterhält das Brennen. Auf die Öffnungen des Rostes drückt von innen die warme Luft des Kamines nach den Gesetzen des Bodendruckes, von außen der Druck einer gleich hohen Säule kalter Luft; der Unterschied beider bewirkt den Luftzug; dieser ist um so größer, je höher der Kamin und je größer der Unterschied in der Temperatur, also im sp. G. ist. Deshalb haben große Feuerungsanlagen auch sehr hohe Kamine, und ist der Luftzug im Sommer schwächer als im Winter.

Auf dem Aufsteigen der erwärmten Luft beruht auch die Ventilation geheizter Zimmer; Ventilation heißt Luftwechsel oder Lufterneuerung. Da der Mensch beim Atmen gute Luft einatmet und schlechte, d. h. insbesondere mit Kohlensäure sehr stark vermischte Luft, die zum weiteren Atmen nicht mehr tauglich ist, ausatmet, so muß in einem bewohnten Raume die Luft allmählich und beständig erneuert werden. Dies erreicht man im Sommer leicht durch Öffnen von Fenstern und Thüren. Im Winter, wenn Thüren und Fenster geschlossen sind, ventiliert sich das Zimmer von selbst, wenn es geheizt ist; denn die wärmere Zimmerluft hat das Bestreben aufzusteigen, und die kalte, äußere Luft hat das Bestreben, unten hereinzuströmen. Die Wände, sowie Boden und Decke sind nun aber porös, und wenn auch die Poren sehr klein sind, so sind sie dafür in sehr großer Anzahl vorhanden, so daß die Luft,

da sie ein sehr feiner Körper ist, ziemlich leicht durch sie hindurchgehen kann. Dazu kommen noch die Ritzen in Böden, Fenstern und Thüren. Es strömt also in einem geheizten Raum beständig die kalte Luft am Boden und den unteren Teilen der Wände herein, die warme durch die Decke und den oberen Teil der Wände hinaus.

Diese Selbstventilation genügt vollständig, wenn die Temperaturdifferenz ziemlich groß ist, in dem Zimmer nur mäßig viele Personen sich befinden, die Wände porös und trocken sind, das Haus selbst ziemlich frei liegt und nicht zu dicht bewohnt ist. Das ist aber nur sehr selten der Fall. Sie genügt also nicht, wenn zu viele Personen im Zimmer sind, und insbesondere wenn mehrere Lichter brennen, deren jedes ungemein viel Luft verbraucht; ferner wenn das Haus in engen, winkligen Gassen oder an kleinen, unreinlichen Höfen liegt; denn aus diesen kommt selbst schlechte Luft ins Haus; ferner wenn das Haus hoch und dicht bewohnt ist; denn die Luft der unteren Stockwerke kommt auch in die oberen, und ist dann schon teilweise verdorben. Das untere Stockwerk bekommt die Luft auch aus dem Keller; dieser aber erhält Luft aus dem umliegenden Erdreich. Die in der Erde befindliche Luft, Grundluft, ist aber in der Regel geradezu untauglich zum Atmen; denn schon für gewöhnlich enthält diese Grundluft eine Unmasse von Kohlensäure, und wenn, wie es in Städten der Fall ist, der Untergrund noch verunreinigt ist durch die tierischen und pflanzlichen Stoffe, die in ihn eindringen und dort vermodern, so enthält die Grundluft noch viele, geradezu giftige Gase, die bei dieser Vermoderung entstehen. Da nun jedes bewohnte, also auch geheizte Haus meistens wärmer ist als die umliegende Luft, so steigt die Luft im Hause in die Höhe und es strömt Luft nicht bloß von den Seiten, sondern auch vom Untergrunde ins Haus, und wenn auch die Grundluft nur langsam eindringt, so dringt sie doch beständig ein. Sie ist zum Atmen untauglich, ja geradezu giftig, und verdirbt die Luft des Hauses, insbesondere aber zunächst die Luft im Keller. Kellerwohnungen sind demnach ungemein ungesund und in manchen Städten deshalb sogar verboten. Ekelhaft riechend und gesundheitsgefährlich ist auch die Kanalluft, welche aus den Kanälen einer Stadt durch die Küchenausgußröhren in die Wohnungen dringt, wenn die Röhren nicht durch u förmigen Wasserabschluß geschlossen sind.

Wo die natürliche Selbstventilation nicht ausreicht, um die Luft eines Zimmers stets rein genug zu erhalten, muß man durch andere Mittel nachhelfen; solche sind: fleißiges Lüften der Zimmer; Öfen, die vom Zimmer aus, nicht vom Gange aus geheizt werden, denn diese entnehmen alle Luft, die sie brauchen, vom Zimmer, so daß wieder ebensoviel Luft von außen hereinströmen muß; zweckmäßig angebrachte Öffnungen, z. B. Öffnen einer ganzen Fensterscheibe möglichst hoch oben; dadurch daß nun die obere Luft leichter hinaus-

strömen kann, strömt unten mehr herein; das Öffnen einer Fensterscheibe in der Mitte des Fensters hat häufig gar keinen Zweck, weil an dieser mittleren Stelle (mittlere Höhe des Zimmers) die Luft weder ein- noch auszuströmen das Bestreben hat; schließlich das Anbringen einer künstlichen Ventilation. Eine solche besteht meistens aus einem kaminähnlichen Schachte, der von der Decke, oder besser vom Fußboden aus durch das ganze Haus in die Höhe führt bis über das Dach hinaus; unten brennt in diesem Schachte beständig eine Gasflamme, welche die Luft in demselben erwärmt. Der Schacht wirkt dann wie ein Kamin und entnimmt dem Zimmer viel verdorbene Luft.

Leider ist meistens für gute, ausreichende Ventilation nicht gesorgt, so daß Leute, die sich viel in schlecht gelüfteten, engen Wohnungen, Fabriksälen, Werkstätten, Kellern rc. aufhalten müssen, ohne Zeit und Gelegenheit zu haben, sich auch wieder ausgiebig in frischer Luft zu bewegen, vielfach Schaden leiden an Gesundheit und Arbeitskraft; sie werden blaß, matt, kraftlos, abgemagert, können nicht gut verdauen und werden dann leicht von Krankheiten angegriffen, denen der geschwächte Körper nicht zu widerstehen vermag.

53. Erhöhung der Expansivkraft der Luft durch Wärme.

Wir haben gesehen, daß sich Luft ausdehnt, wenn sie erwärmt wird, und dabei vorausgesetzt, daß sie sich auch wirklich ausdehnen kann, sich also in einem offenen Gefäße befindet, das mit der gewöhnlichen Luft in Verbindung steht. Da die ausgedehnte Luft auch dem äußeren Luftdrucke das Gleichgewicht hält, so hat sie auch noch die Spannkraft von einer Atmosphäre, obwohl sie sich ausgedehnt hat. Das Mariotte'sche Gesetz, demgemäß ein Gas eine geringere Spannkraft bekommt, wenn es sich ausdehnt, gilt also nur, wenn das Gas dieselbe Temperatur beibehält.

Wenn die Luft in einem verschlossenen Gefäße erwärmt wird, so kann sie sich nicht ausdehnen, und die Wirkung der Erwärmung zeigt sich dann darin, daß die erwärmte Luft eine größere Spannkraft bekommen hat. Diese größere Spannkraft ist genau so groß, wie wenn man die Luft durch Erwärmung zuerst sich hätte ausdehnen lassen, und diese ausgedehnte Luft unter Beibehaltung ihrer Temperatur wieder auf das ursprüngliche Volumen zusammengepreßt hätte. Bei der Ausdehnung wird aber das Volumen v_0 der Luft vergrößert auf $v_0\ (1 + kt)$, es wird also $(1 + kt)$ mal größer, aber ihre Spannkraft bleibt dieselbe, p_0. Drückt man das vergrößerte Volumen auf das ursprüngliche zusammen, macht es also wieder $(1 + kt)$ mal kleiner, so wird nach dem Mariotte'schen Gesetz ihre Spannkraft $(1 + kt)$ mal größer, demnach ist die durch Erwärmung vergrößerte Spannkraft der eingeschlossenen

Luft $= p_0 (1 + kt)$. Man erkennt ebenso wie früher, daß die Spannkraft der Luft bei 100° 1,367 Atmospären, bei 200° 1,734 Atm., bei 273° 2 Atm., bei 546° 3 Atm. beträgt, und daß sie für je weitere 273° um 1 Atm. wächst.

Die Formeln $v_1 = v_0 (1 + kt_1)$ und $p_1 = p_0 (1 + kt_1)$ enthalten das Gay Lussac'sche Gesetz, demgemäß entweder das Volumen oder der Druck des Gases $(1 + kt_1)$ mal größer wird, wenn man das Gas von 0° auf t_1 Grad erwärmt.

Hat ein Gas ein Volumen v_0 bei 0° einen Druck p_0, und setzt man es einem andern Druck p_1 aus, wobei man dafür sorgt, daß die Temperatur 0° beibehalten wird, so bekommt es ein anderes Volumen v_1 und es ist nach dem Mariotte'schen Gesetz:

$$v : v_0 = p_0 : p_1 ; \quad v = v_0 \cdot \frac{p_0}{p_1}.$$

Erwärmt man diese Volumen v von 0° auf t_1°, wobei man dafür sorgt, daß der jetzige Druck p_1 unverändert bleibt, und das Gas sich ungehindert ausdehnen kann, so wird das Volumen $(1 + kt_1)$ mal größer nach dem Gay Lussac'schen Gesetz; demnach ist sein neues Volumen

$$v_1 = \frac{v_0 p_0}{p_1} (1 + kt_1), \text{ oder } v_0 p_0 = \frac{v_1 p_1}{1 + kt_1}.$$

Bringt man dasselbe Gas vom Volumen v_0 und dem Druck p_0 auf den Druck p_2 und die Temperatur t_2, so ist ebenso

$$v_0 p_0 = \frac{v_2 p_2}{(1 + kt_2)}; \text{ daher ist durch Vergleichung:}$$

$$\frac{v_1 p_1}{1 + kt_1} = \frac{v_2 p_2}{1 + kt_2}.$$

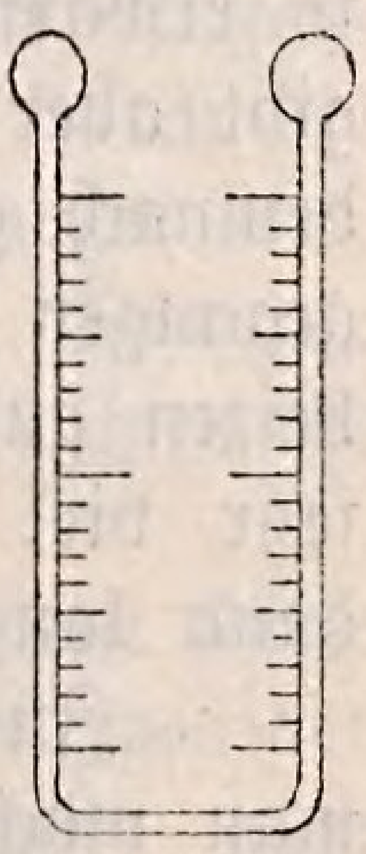
Diese Formel enthält das vereinigte Mariotte-Gay-Lussac'sche Gesetz; sie zeigt, daß das Volumen eines Gases bloß vom Druck und von der Temperatur abhängig ist, ebenso, daß der Druck eines Gases (durch v_1, p_1, t_1 bestimmt) nur vom Volumen (v_2) und der Temperatur (t_2) abhängt, ebenso, daß die Temperatur eines Gases (durch v_1, p_1, t_1 bestimmt) nur vom Volumen (v_2) und dem Druck (p_2) abhängt, d. h. daß man dem Gas (v_1, p_1, t_1) eine ganz bestimmte Temperatur t_2 geben muß, wenn es bei vorgeschriebenem Volumen (v_2) einen vorgeschriebenen Druck (p_2) ausüben soll.

Die Formel zeigt allgemein, wie ein Element des neuen Zustandes (v_2 oder p_2 oder t_2) aus den Elementen des früheren Zustandes ($v_1 p_1 t_1$) und zwei gegebenen Elementen des neuen Zustandes berechnet werden kann.

Diese Formel enthält sowohl das Mariotte'sche Gesetz als auch die beiden Arten des Gay-Lussac'schen Gesetzes als Spezialfälle in sich.

Es muß bemerkt werden, daß es für den zweiten Zustand ($v_2 p_2 t_2$) gleichgültig ist, in welcher Reihenfolge die Elemente des ersten Zustandes ($v_1 p_1 t_1$) in den zweiten übergeführt worden sind, ob sie gleichzeitig oder nach einander geändert wurden, oder ob sogar Umwege gemacht wurden.

Auf der Ausdehnung der Luft beruht das Luftthermometer, wie es vor Erfindung der Weingeistthermometer benützt wurde. Zuerst von Drebbel erfunden, stellte sich Guericke ein Luftthermometer her, bestehend aus einer kupfernen mit Luft gefüllten Kugel, an die sich unten eine U-Röhre anschloß, mit Wasser gefüllt; bei Erwärmung der Luft schob sie das Wasser nach abwärts, so daß es im andern Schenkel stieg. Die heutigen Luftthermometer sind ähnlich eingerichtete Apparate von hoher Vollkommenheit, und dienen dazu, die Angabe der Quecksilberthermometer zu kontrollieren.


Fig. 77.

Das Differenzialthermometer (von Rumford) besteht aus zwei mit Luft gefüllten Glaskugeln, die auf den Schenkeln einer U-Röhre aufsitzen; die Röhre ist zur Hälfte mit einer Flüssigkeit (Öl) gefüllt und eng. Ist die Luft in beiden Kugeln gleich warm, so steht die Flüssigkeit in beiden Schenkeln gleich hoch; ist die Luft in der einen Kugel wärmer, so drückt sie die Flüssigkeit in ihrem Schenkel nach abwärts, so daß sie im andern Schenkel steigt. Der Apparat ist sehr empfindlich für geringe Temperaturunterschiede und wird benützt, um solche, nicht um die wirkliche Temperatur zu messen.

54. Wärmeleitung.

Wenn man einen Körper an einer Stelle erwärmt, so verbreitet sich die Wärme von dieser Stelle aus nach den kälteren Teilen des Körpers; diesen Vorgang nennt man Wärmeleitung. Ein Körper ist ein guter Wärmeleiter, wenn er große Mengen Wärme in kurzer Zeit von einer Stelle zu einer entfernten leitet, oder ein schlechter Wärmeleiter, wenn er nur wenig Wärme und langsam leitet, und unterscheidet auch noch Halbleiter, die in ihrem Leitungsvermögen zwischen den guten und schlechten Leitern stehen.

Gute Wärmeleiter sind nur die Metalle; man weiß ja, daß ein Nagel, den man am einen Ende mit der Hand und mit dem andern in eine Flamme hält, in kurzer Zeit durch Leitung so heiß wird, daß man ihn nicht mehr halten kann. Jedoch ist die Leitungsfähigkeit der Metalle sehr verschieden, wie man an dem Apparat von Ingenhous sehen kann; aus einem Blechkästchen ragen gleich dicke Stäbe verschiedener Metalle horizontal heraus; sie sind mit Wachs überzogen. Man füllt Wasser von 100° ein, so pflanzt die Wärme sich durch Leitung fort, und das Wachs schmilzt an den Stäben ab, und zwar um so rascher und weiter, je besser die Lei-

tungsfähigkeit ist. Bezeichnet man die Leitungsfähigkeit von Silber willkürlich mit 100, so hat Kupfer 74, Gold 53, Messing 23, Zink 19, Zinn 14, Eisen 12, Blei 8, Platin 8, Wismut 2. Von den billigeren Metallen leitet besonders Kupfer die Wärme sehr gut, 6mal besser als Eisen, weshalb es sehr gern zu Kochgefäßen, Kesseln, Braupfannen und Wasserheizungsröhren verwendet wird.

Unter die Halbleiter rechnet man die Steine, Glas, Porzellan, Thon. Sie leiten die Wärme viel schlechter als die Metalle; so erwärmt sich ein irdener Ofen viel langsamer als ein eiserner, gibt aber auch seine Wärme viel langsamer an die Luft ab, erwärmt demnach gleichmäßiger und noch lange Zeit, nachdem das Feuer ausgegangen ist. Sehr große irdene Öfen (Kachelöfen, Porzellanöfen) heizen gut; denn die große Masse Thon, aus der sie bestehen, nimmt sehr viel von der Wärme des Feuers auf und gibt diese Menge dann langsam an das Zimmer ab.

Zu den schlechten Leitern gehören zunächst Wasser und Luft; man möchte beide für vorzügliche Leiter halten, weil, wie bekannt, ein Topf Wasser auf das Feuer gestellt, sich rasch und gleichmäßig durchwärmt, und weil ebenso die Luft in einem Zimmer sich rasch gleichmäßig durchwärmt. Diese Erscheinung haben wir beim Wasser schon früher als Folge der eintretenden Circulation erklärt, und eine ganz ähnliche Circulation findet auch bei der Luft in einem geheizten Raume statt; die Luft wird am Ofen erwärmt, dehnt sich aus, steigt in die Höhe, streicht an der Decke nach allen Seiten fort, geht an den Wänden nach abwärts und strömt wieder auf den Ofen zu.

Daß das Wasser die Wärme sehr schlecht leitet, erkennt man dann, wenn man es oben erwärmt, so daß die erwärmten und deshalb leichten Wasserteilchen oben bleiben und nicht in Circulation kommen, so daß nur durch Leitung sich die Wärme nach abwärts fortpflanzen kann.

Zu den schlechten Wärmeleitern gehören dann noch Kautschuk, Schwefel, Bein, Horn u. s. w.; dann eine große Anzahl lockerer Körper, wie Sägspähne, Stroh, Laubwerk, Asche, Wolle, Tuch, Haare, Pelz, Federn, Schnee, Asbest, Glaswolle und ähnliche. Diese lockeren Körper leiten die Wärme schlecht, weil schon ihre Masse schlecht leitet, dann weil zwischen ihren fein zerteilten Teilen eine große Menge Luft vorhanden ist, die ja die Wärme an sich schlecht leitet, und weil sie noch dazu in so engen Räumen enthalten ist, daß sie nicht gut circulieren, also auch so die Wärme nicht gut fortpflanzen kann.

Will man einen kalten Körper gegen das Eindringen der Wärme, oder einen warmen Körper gegen das Ausströmen seiner Wärme, also gegen Abkühlung schützen, so umgibt man ihn mit einer Schichte lockerer Körper, die man deshalb auch Isolatoren nennt (isolieren = allein stellen, außer Verbindung mit der Umgebung setzen).

Beispiele sind: der Gärtner schützt die Mistbeete gegen Frost durch leichte Strohmattten, Strohdächer halten den Stall im Sommer kühl, im Winter warm (Metalldächer liefern bei Sonnenschein eine unausstehliche Hitze), Gräser und Saatkeime überdauern unter einer Schneedecke die strengste Kälte. Eis verpackt man in Kisten mit doppelten Wänden, wobei der Zwischenraum durch Sägspäne ausgefüllt ist, und kann es dann ohne großen Verlust weit transportieren. Feuerfeste Geldschränke haben doppelte Wände, deren Zwischenraum durch Holzasche angefüllt ist; wenn bei einer Feuersbrunst die Außenwände sogar glühend werden, so pflanzt sich die Wärme durch die Aschenschichte doch nur so langsam in das Innere des Schrankes fort, daß, wenn der Brand nicht gar zu lange dauert, die im Schranke befindlichen Wertpapiere, Geschäftsbücher u. s. w. durch die Hitze nicht verdorben werden.

Die Tiere sind durch Pelz oder Federn hinreichend gegen Kälte geschützt, wir schützen uns durch die Kleider, bei denen es weniger auf die Schwere als auf die Feinheit des Stoffes ankommt; auch bei Federn kommt es nicht auf das Gewicht, sodern darauf an, daß sie leicht und locker (flaumig) sind, und so eine dicke Luftschicht bilden, die dann die Wärme ungemein wenig leitet.

Dampfkessel, die sich nicht abkühlen sollen, umhüllt man mit Mauerwerk aus besonders porösen Steinen (Korksteine) oder mit Filz, Asbest, Glaswolle u. s. w., ebenso Dampfröhren.

55. Wärmemenge und Wärmequellen.

Die Temperatur oder den Wärmezustand eines Körpers mißt man mittels des Thermometers durch Angabe des Temperaturgrades. Damit könnte man auch die Wärmemenge messen, die in einem warmen Körper enthalten ist, wenn alle Körper zu ihrer Erwärmung gleich viel Wärme brauchen würden. Dies ist jedoch nicht der Fall, wie man aus folgendem Versuche leicht erkennt. Schüttet man in ein Gefäß 1 *kg* Wasser von 0^{0} und dazu 1 *kg* Kupfer, fein zerteilt, etwa als Drahtstücke, auf 100^{0} erwärmt, so sind beide nach kurzer Zeit gleich warm, aber nicht etwa 50^{0}, wie man meinen sollte, sondern nur $8{,}3^{0}$; all die Wärme, welche das Kupfer hergibt; wenn es sich von 100^{0} auf $8{,}3^{0}$ abkühlt, genügt nur, um das Wasser um $8{,}3^{0}$ zu erwärmen. Man erkennt aus solchen Versuchen, daß man bei verschiedenen Körpern verschiedene Mengen Wärme braucht, um ihre Temperatur um eine gewisse Anzahl Grade zu steigern.

Man muß sich also, um die Wärmemenge mittels der Temperatur messen zu können, an einen bestimmten Stoff halten, z. B. an das Wasser, und sagt:

Die Einheit der Wärmemenge oder eine Kalorie ist diejenige Wärmemenge, welche 1 *kg* Wasser braucht, damit es um 1^{0} *C*

wärmer wird. Um also etwa 6 *kg* Wasser um 5 ° C zu erwärmen, braucht man 30 Kalorien u. s. f. Eine kleine Kalorie = 0,001 Cal. ist die Wärmemenge, welche 1 *g* Wasser aufnimmt, wenn es um 1 ° C wärmer wird.

Unter Verbrennungswärme versteht man die Anzahl von Kalorien, welche 1 *kg* eines Stoffes beim Verbrennen liefert.

Holz, ganz trocken . .	3800	Koaks, 0,1 Asche . . .	7000
„ mit 25 % Wasser .	2675	„ 0,2 „ . . .	6250
Holzkohlen, ganz trocken .	7580	Wasserstoffgas	34500
Torf, guter, trocken . .	5000	Kohlenoxydgas	2400
„ schlechter (0,2 Asche		Sumpfgas	13000
0,15 Wasser) . . .	3140	Ölbildendes Gas . . .	12000
Braunkohlen 1. Qual. .	6000	Leuchtgas	11600
„ 2. „ .	5000	Baumöl	11200
Steinkohlen 1. Qual.		Rüböl	9300
(0,03 Asche) . . .	7500	Steinöl, sp. G. 0,827 .	7338
Steinkohlen 2. Qual.		Terpentinöl	10850
0,1 Asche	6900	Weingeist	7200
Steinkohlen 3. Qual.		Talg	8370
0,2 Asche	6100	Schwefel	2200
Anthrazit	7800	Phosphor	5747

Man sieht, daß die Heizkraft der Brennmaterialien sehr verschieden ist, jedoch liefert jeder Brennstoff z. B. 1 *kg* Holz stets gleich viel Kalorien, gleichgültig ob man ihn rasch oder langsam verbrennt, wenn nur die Verbrennung jedesmal eine vollständige ist. Es kommen auch andere Vorgänge vor, die man als Verbrennungen bezeichnen muß, obwohl der dabei auftretende Temperaturgrad ein niedriger bleibt, also keineswegs die gewöhnliche Verbrennungstemperatur erreicht. Z. B. beim Atmen verbinden sich die in unser Blut übergegangenen Speisestoffe mit dem Sauerstoffe der Luft gerade so wie bei der Verbrennung; dabei entwickelt sich der Menge nach ebensoviel Wärme, ebensoviel Kalorien, wie wenn der Stoff direkt in der Luft verbrennt; wenn also Mehl, Zucker, Fett, Spiritus und ähnliche Stoffe von uns genossen werden, dann durch die Verdauung ins Blut kommen und dort beim Atmen verbrennen, so liefern sie Wärme, die als unsere Körperwärme vorhanden ist, oder deren Abgänge ersetzt. Die Bewohner der kalten Zone verzehren deshalb viel Fett.

Bei unsern Feuerungsanlagen geht die größte Menge der erzeugten Wärme unbenützt verloren.

Unsere mächtigste Wärmequelle, die Sonne, liefert uns so viel Wärme, daß ein an der oberen Grenze der Atmospähre befindliches senkrecht beschienenes Quadratcentimeter in jeder Minute 4 kleine Kalorien (= 0,004 Kal.) erhält (Solarkonstante).

Eine weitere Wärmequelle ist die Reibung. Bei jeder Reibung entsteht Wärme, weshalb sich die Säge, der Bohrer erwärmt, eine schlecht geschmierte Axe wohl auch so stark erhitzt, daß sie glühend wird.

Da bei Überwindung der Reibung einerseits Arbeit aufgewendet werden muß, andrerseits Wärme erzeugt wird, so sagt man, die aufgewandte Arbeit hat sich in Wärme verwandelt; man fand, daß durch Aufwand von 425 *kgm* Arbeit 1 Kalorie erzeugt wird, und nennt deshalb diese Arbeitsgröße das mechanische Äquivalent der Wärme.

Auch durch Stoß wird Wärme erzeugt, insofern als durch den Stoß auch eine Bewegung verschwindet, also die früher zur Bewegung des stoßenden Körpers aufgewandte Arbeit verschwindet. Durch Hammerschläge kann Blei erhitzt, ein eiserner Nagel sogar zum Glühen gebracht werden.

56. Spezifische Wärme.

Wärmekapazität oder spezifische Wärme ist die Menge Wärme, welche 1 *kg* eines Stoffes braucht, wenn es um einen Grad erwärmt wird. Man kann sie bestimmen durch die Mischungsmethode. Ich mische etwa 3 *kg* Wasser von 12° mit 5 *kg* Eisen von 100°, wobei das Eisen fein zerteilt ist, rühre rasch um und finde die Temperatur des Gemisches etwa = 25°, so hat das Wasser um 13° zugenommen, das Eisen um 75° abgenommen; beide Wärmemengen müssen einander gleich sein; also, wenn x die Kapazität des Eisens ist, so ist: $13 \cdot 3 = 75 \cdot x \cdot 5$;

hieraus $x = \frac{13 \cdot 3}{75 \cdot 5} = 0{,}104$, d. h. 1 *kg* Eisen braucht zu seiner Erwärmung 0,104 Kalorien. So findet man die Wärmekapazität des Eisens = 0,1138.

Wie man aus folgender Tabelle ersieht, haben die Metalle eine sehr kleine Wärmekapazität, Wasser hat weitaus die größte, nur Wasserstoffgas hat eine größere. Wegen der großen Wärmekapazität und der schlechten Leitungsfähigkeit erwärmt sich Wasser nur langsam; insbesondere große Wassermassen, wie Flüsse, Seen, das Meer nehmen untertags nur wenig Wärme zu, kühlen sich auch nachts nur wenig ab.

Tabelle der Wärmekapazität.

Kupfer	0,0939	Wismut	0,0308	Alkohol	0,70
Zinn	0,0555	Eis	0,502	Luft	0,2377
Blei	0,0314	Holz	0,6	Ätherdampf	0,4810
Zink	0,0956	Hohlzkohle	0,2415	Kohlensäure	0,2164
Nikel	0,1092	Graphit	0,2040	Kohlenoxyd	0,2479
Platin	0,0324	Diamant	0,1469	Sauerstoff	0,2182
Quecksilber	0,0319	Glas	0,177	Wasserstoff	3,4046
Silber	0,0570	Olivenöl	0,31	Wasserdampf	0,4750

57. Schmelztemperatur.

Wenn man einen festen Körper, wie Eis, Blei, Schwefel u. s. w. stark genug erwärmt, so schmilzt er, d. h. er verwandelt sich in einen flüssigen Körper, und diese Veränderung des Aggregatszustandes ist eine der wichtigsten Wirkungen der Wärme.

Das Schmelzen fester Körper findet stets bei einer gewissen Temperatur statt, die man die Schmelztemperatur oder den Schmelzpunkt nennt. In folgender Tabelle findet man die Schmelzpunkte einiger Körper in Celsiusgraden.

Die leichtschmelzbaren oder leichtflüssigen Metalle:	
Zinn	230
Wismut	262
Blei	326
Zink	415
Antimon	432
Die schwerschmelzbaren oder strengflüssigen Metalle:	
Aluminium	700
Silber	1000
Kupfer	1050
Gold	1250
Gußeisen	1050—1200
Stahl	1300—1400
Schmiedeisen	1600

Platin	über 1600
Olivenöl	4
Palmöl	26
Butter	33
Schweinfett	41
Talg	43
Stearin	49
Phosphor (weißer)	44
Wachs	61
Asphalt	100
Schwefel	110
Harz	135
Meerwasser	—2,5
Terpentinöl	—10
Mohnöl	—18
Leinöl	—20
Alkohol	—90

Bei manchen Körpern liegt der Schmelzpunkt so hoch, daß man ihn durch unsere gewöhnlichen Hitzgrade und Heizmethoden gar nicht erreichen kann; solche Körper heißen feuerfeste Körper; solche sind besonders reiner Thon, aus dem deshalb die Schmelzöfen, Hochöfen, Herdfütterungen, Tiegel zum Schmelzen des Glases und der Metalle (Hessische Tiegel) hergestellt werden. Auch Kohle ist unschmelzbar, und da Graphit nur eine besondere Art von Kohle und recht dicht ist, so daß es fast gar nicht verbrennt, so stellt man aus ihm sehr brauchbare Schmelztiegel für Metalle (Passauer-Tiegel) her. Man hat Grund anzunehmen, daß auch die scheinbar unschmelzbaren Körper bei genügend hoher Temperatur schmelzen oder sich ersetzen, und man hat jetzt schon Mittel, um Thonerde in größeren Mengen zu schmelzen.

Wird die Temperatur eines geschmolzenen Körpers wieder bis unter die Schmelztemperatur erniedrigt, so wird er wieder fest, er erstarrt oder erfriert. Dabei hat er, bis er ganz erstarrt ist, dieselbe Temperatur, welche er beim Schmelzen hatte, also die Schmelztemperatur.

Die Schmelztemperatur eines Metalles wird niedriger, wenn ihm leichter schmelzbare Metalle beigemischt sind. Eine Legierung von Silber oder Gold mit Kupfer schmilzt bei niedrigerer Temperatur als reines Silber oder Gold, Messing schmilzt früher als Kupfer, weil Messing aus Kupfer und Zinn gemischt ist. Bei manchen Metallegierungen ist die Schmelztemperatur der Mischung sogar niedriger, als die des leichtflüssigsten Metalles, das in der Mischung enthalten ist. So benützen die Klempner und Spengler zum Löten von Zinn, Blei, Zink, Kupfer und Messing eine leichtflüssige Metallmischung aus Blei und Zinn, Lot, Schlaglot oder Weichlot genannt; bei 2 Teilen Blei und 3 Teilen Zinn schmilzt es schon bei 169°. Noch leichtflüssigeres Lot benützen die Uhrmacher und Goldarbeiter; es besteht aus 5 Teilen Wismut, 3 Teilen Zinn, 5 Teilen Blei und schmilzt bei 100°. Man kann aus diesen Metallen sogar eine Legierung herstellen, die schon unter 100° schmilzt; 2 Tl. Wism., 1 Blei, 1 Zinn bei 94° (Rosesches Metall).

Wenn Wasser gefriert, dehnt es sich aus und zwar mit sehr großer Kraft; es zersprengt dabei eine eiserne Kugel, in der es eingeschlossen ist (Versuch der Akademie in Florenz). Gefriert Wasser in den Ritzen der Felsen, so zersprengt es dieselben und trägt dadurch zum Verwittern, Abbröckeln der Felsen bei. Starker Winterfrost lockert die Erde.

Eis schmilzt bei 0° und Wasser erstarrt wieder bei 0°, zeigt aber merkwürdige Ausnahmen. Wenn Wasser vor jeder Erschütterung bewahrt ist, so kann man es tief unter 0° abkühlen, ohne daß es gefriert, z. B. wenn es in Form kleiner, runder Tropfen auf Sammt oder einer bestaubten Fläche liegt; Berühren mit einer Nadelspitze reicht dann hin, um den Tropfen zum Teil erstarren zu machen. (Fahrenheit 1721). Auch sinkt der Gefrierpunkt bei großem Drucke etwas, nämlich bei jeder Atmosphäre um $^1/_{135}$° C.

Sind im Wasser fremde Stoffe aufgelöst, so liegt der Gefrierpunkt unter 0° und zwar um so tiefer, je mehr Stoffe darin sind. Meerwasser gefriert erst bei —2,5°, Wasser mit Kochsalz ganz gesättigt gefriert erst bei —21°. Früchte, wie Äpfel, Birnen, Rüben, Kartoffel und ähnliche, enthalten viel Wasser; da jedoch in denselben viel Zucker, Gummi, Stärkmehl, Essigsäure, Apfelsäure und ähnliches aufgelöst ist, so gefrieren solche Früchte erst einige Grade unter 0°, können also einen leichten Frost aushalten, ohne zu erfrieren. Die Bäume, Knospen, Gräser, Getreidekeime und ähnliches sind im Winter nicht ganz saftlos, jedoch saftarm, d. h. ihr Saft enthält sehr viele fremde Stoffe aufgelöst, so daß er dickflüssig ist; er gefriert also auch bei sehr strenger Kälte nicht, weshalb diese Gewächse auch im Winter ausdauern.

58. Schmelzwärme.

Die Regel, daß ein Körper wärmer wird, wenn man ihm Wärme zuführt gilt nicht, wenn er seinen Aggregatszustand verändert, wenn er also aus dem festen Zustand in den flüssigen übergeht, schmilzt, oder wenn er aus dem flüssigen Zustand in den luftförmigen übergeht, verdampft. Wenn man eine Schüssel voll Schnee oder Eis ins warme Zimmer bringt oder sogar auf das Feuer stellt, so schmilzt es wohl, aber ein hineingestecktes Thermometer zeigt beständig auf 0°, bis alles Eis geschmolzen ist. Alle Wärme, die während des Schmelzens dem Schnee zugeführt wurde, hat also nicht dazu gedient, um den Schnee zu erwärmen, sondern bloß dazu, um den Schnee zu schmelzen. **Die zum Schmelzen verwendete Wärmemenge nennt man die Schmelzwärme des Wassers,** das ist die beim Schmelzen aufgenommene Wärme, oder auch **latente oder gebundene Wärme** des Wassers, weil sie beim Schmelzen verschwunden ist, sich verborgen hat (latent), gebunden oder verbraucht worden ist, eben um das Eis zu schmelzen. Ebenso findet man, daß jeder andere Körper zum Schmelzen Wärme verbraucht, und zwar beträgt die Schmelzwärme bei Wasser 80 Kal. (genauer 79,25), bei Phosphor 5 Kal., Schwefel 9,4, Zinn 14,3, Blei 5,4, Zink 28,1, Silber 21,1, Quecksilber 2,8 Kal.

Mischt man 1 *kg* Wasser von 80°, und 1 *kg* Eis von 0°, so schmilzt das Eis vollständig, und man erhält 2 *kg* Wasser von 0°; die ganze Wärme des Wassers von 80°, also 80 Kal. sind verschwunden, verbraucht worden von dem 1 *kg* Eis bloß zum Schmelzen. Diese Schmelzwärme des Wassers spielt in der Natur eine große Rolle: sie verzögert zu Ende des Winters die Erwärmung, denn es bedarf beträchtlicher Mengen Sonnenwärme, um die großen Massen Schnee und Eis abzuschmelzen. Ist ein Teich dick zugefroren und es tritt im Frühjahr Sonnenschein ein, so erwärmt sich die umliegende Erde ziemlich rasch, während die Eisdecke des Teiches noch nicht geschmolzen ist. Indem man in einen Eiskeller große Massen Eis bringt, und dafür sorgt, daß die äußere Wärme nur langsam eindringen kann, kann man den Eiskeller auch über den Sommer kalt erhalten; denn die eindringende Wärme wird vom Eise verbraucht zum langsamen Schmelzen, so daß die Temperatur im Keller nicht steigt, sondern stets nahe an 0° bleibt. Soll einem Kranken Kühlung verschafft werden, so legt man ihm einen mit Eis gefüllten Beutel auf, der mehrere Stunden lang eine Temperatur von 0° behält, bis nämlich alles Eis geschmolzen ist.

Wenn ein flüssiger Körper wieder fest wird, so gibt er seine latente Wärme wieder her. Wirft man ein Stück Blei, das viele Grade unter 0° erkaltet ist, in Wasser von 0°, so überzieht es sich mit einer Eiskruste, während seine Temperatur auf 0° steigt; das

hiebei gefrierende Wasser gibt seine latente Wärme her und diese erwärmt das Blei. Wenn man in einem Zimmer, das mehrere Grade unter 0 kalt ist, nasse Wäsche von 0° aufhängt, so gefriert die Wäsche und die Temperatur der Zimmerluft steigt. Wenn kalte Luft von etwa —10° über einen großen See von 0° streicht, so gefriert das Wasser, seine latente Wärme wird frei, teilt sich der Luft mit und erwärmt sie, so daß sie am anderen Ufer etwa bloß —8° kalt ist. Wasserreichtum eines Landes mildert demnach die Strenge des Winters, denn für jedes *kg* Wasser, das gefriert, werden 80 Kalorien frei, die der Luftwärme zu gute kommen.

Wenn ein fester Körper sich in Wasser auflöst, so wird dadurch das Wasser kälter; denn der feste Körper, wie Salz, Zucker, u. s. w. geht aus dem festen in den flüssigen Aggregatszustand über und verbraucht dabei Wärme. Umgekehrt muß man gerade aus diesem Wärmeverbrauch schließen, daß sich das Salz wirklich in einen flüssigen Körper verwandelt, also schmilzt, daß es nicht bloß als sehr fein zerteilter fester Körper im Wasser enthalten ist, wie etwa Tusch, sondern wirklich flüssig geworden ist. Manche Salze lösen sich in sehr großer Menge in Wasser auf; z. B. 1 *kg* salpetersaures Ammoniak in 1 *l* Wasser; dabei sinkt die Temperatur von + 10° auf — 15,5° C.

Wenn man Schnee oder fein gestoßenes Eis mit Salz vermischt, so geschieht folgendes: das Salz hat eine so große Begierde sich in Wasser aufzulösen, daß es sogar, wenn es mit Eis in Berührung kommt, dasselbe flüssig macht, um sich in demselben aufzulösen; man bemerkt also, daß sich in dem Gemische viel Salzwasser bildet. Weil nun sowohl Eis als Salz sich in flüssige Körper verwandeln, so verbrauchen sie viel Wärme, weshalb das Gemisch kalt wird; seine Temperatur sinkt bis —21°. Wenn man also in das Gemisch ein Blechgefäß mit Wasser stellt, so gefriert das Wasser. Mittels solcher Kältemischung macht man Gefrornes. Ebenso erhält man Kältemischungen, wenn man Schnee oder Eis mit konzentrierter Schwefelsäure oder Salzsäure mischt, weil auch diese Stoffe eine so große Begierde haben, sich mit Wasser zu verbinden, daß sie das Eis flüssig machen. 1,3 *kg* krystallisiertes Chlorcalcium mit 1 *kg* Schnee gemischt, gibt sogar —49°. Die Kältemischung von Schnee und Salz wurde von Robert Boyle entdeckt.

Ähnliche Kältemischungen sind: 1 *kg* Schnee, 4 *kg* Vitriolöl, 1 *l* Wasser (—32,5°); 1 *kg* Schnee, 0,625 *kg* Salzsäure (—33°); 1 *kg* Schnee, 0,4 *kg* Kochsalz, 0,2 *kg* Salmiak (—24°).

59. Siedetemperatur, Dampfwärme.

Wenn man eine Flüssigkeit stark genug in einem offenen Gefäße erwärmt, so kocht sie, d. h. an den erwärmten Stellen ver-

wandelt sich die Flüssigkeit in Dampf, der in Form von Dampfblasen in die Höhe steigt. **Dampf ist ein luftförmiger Körper, stets durchsichtig und meist farblos,** z. B. bei Wasser, Weingeist und Quecksilber. Die Temperatur, bei welcher eine Flüssigkeit kocht, heißt ihre Siedetemperatur oder ihr Siedepunkt; sie ist bei Wasser 100°, Terpentinöl 157°, Leinöl 316°, konzentr. Schwefelsäure 325°, Quecksilber 357,1°, Schwefel 448°, Benzin 80°, Alkohol 78,4°, Schwefelkohlenstoff 46,8°, Äther 34,9°. Ebenso wie wir Grund haben anzunehmen, daß jeder Stoff, wenn man ihn stark genug erwärmt, schmilzt, so vermuten wir auch, daß jeder Stoff bei hinreichender Erhitzung sich in Dampf verwandelt, daß also etwa Gold, Eisen, Platin, Kohle u. s. w. genügend hoch erhitzt, sich in Dampf verwandeln. Doch kann es dabei vorkommen, daß ein Körper sich zersetzt, d. h. sich in zwei oder mehrere chemisch einfacher zusammengesetzte Stoffe zerlegt (dissoziiert).

Durch ein eingetauchtes Thermometer erfährt man, daß kochendes Wasser seine Temperatur unverändert behält. Man schließt: **Alle dem Wasser während des Kochens zugeführte Wärme wird nicht dazu verwendet, um die Temperatur zu erhöhen, sondern bloß dazu, um das Wasser in Dampf zu verwandeln.** Man nennt diese Wärmemenge die latente oder gebundene Wärme des Dampfes oder die Dampfwärme. Die Dampfwärme des Wassers bei 100° ist 537 Kalorien.

Wasserdampf hat also eine Temperatur von 100° C ebenso wie das Wasser, enthält aber um 537 Kalorien mehr Wärme als das Wasser von 100°. Daher kommt es, daß es lange dauert, bis das in einem Topfe oder Kessel befindliche Wasser ganz verdampft ist. Wasser verdampft an der Luft, ohne zu kochen, es verdunstet; ebenso, sogar noch viel rascher, Spiritus, Äther u. a. m.; auch hiebei wird viel Wärme verbraucht, wodurch der verdunstende Stoff sich abkühlt. Diesen Wärmeverbrauch nennt man Verdunstungskälte. Eine Thermometerkugel mit Leinwand umwickelt und dann mit Äther befeuchtet, wird bis unter 0° abgekühlt.

60. Kondensation der Dämpfe.

Wird der Dampf wieder abgekühlt, so verwandelt er sich wieder in eine Flüssigkeit, er verdichtet oder kondensiert sich; wenn man einen kalten Deckel über kochendes Wasser hält, so beschlägt er sich mit Wasser. Darauf beruht das Destillieren. Wenn nämlich eine Flüssigkeit mit anderen Stoffen verunreinigt ist, und man wünscht die Flüssigkeit rein zu haben, so verwandelt man die Flüssigkeit in Dampf und kondensiert denselben wieder durch Abkühlung.

Ein Destillierapparat besteht aus einem geräumigen Gefäße (Destillierblase, =kolben genannt), in das die Flüssigkeit

gebracht wird; auf dasselbe wird ein luftdicht schließender, meist stark gewölbter Deckel, der Helm oder Hut, aufgeschraubt. Aus dem Helme führt eine Röhre heraus, die in vielen Windungen (Schlangenrohr) durch ein großes Faß, das Kühlfaß, nach abwärts führt, unten aus dem Kühlfaß heraustritt und in eine Vorlage mündet. Das Kühlfaß ist mit kaltem Wasser gefüllt, das durch beständigen Zufluß kalten Wassers erneuert wird.

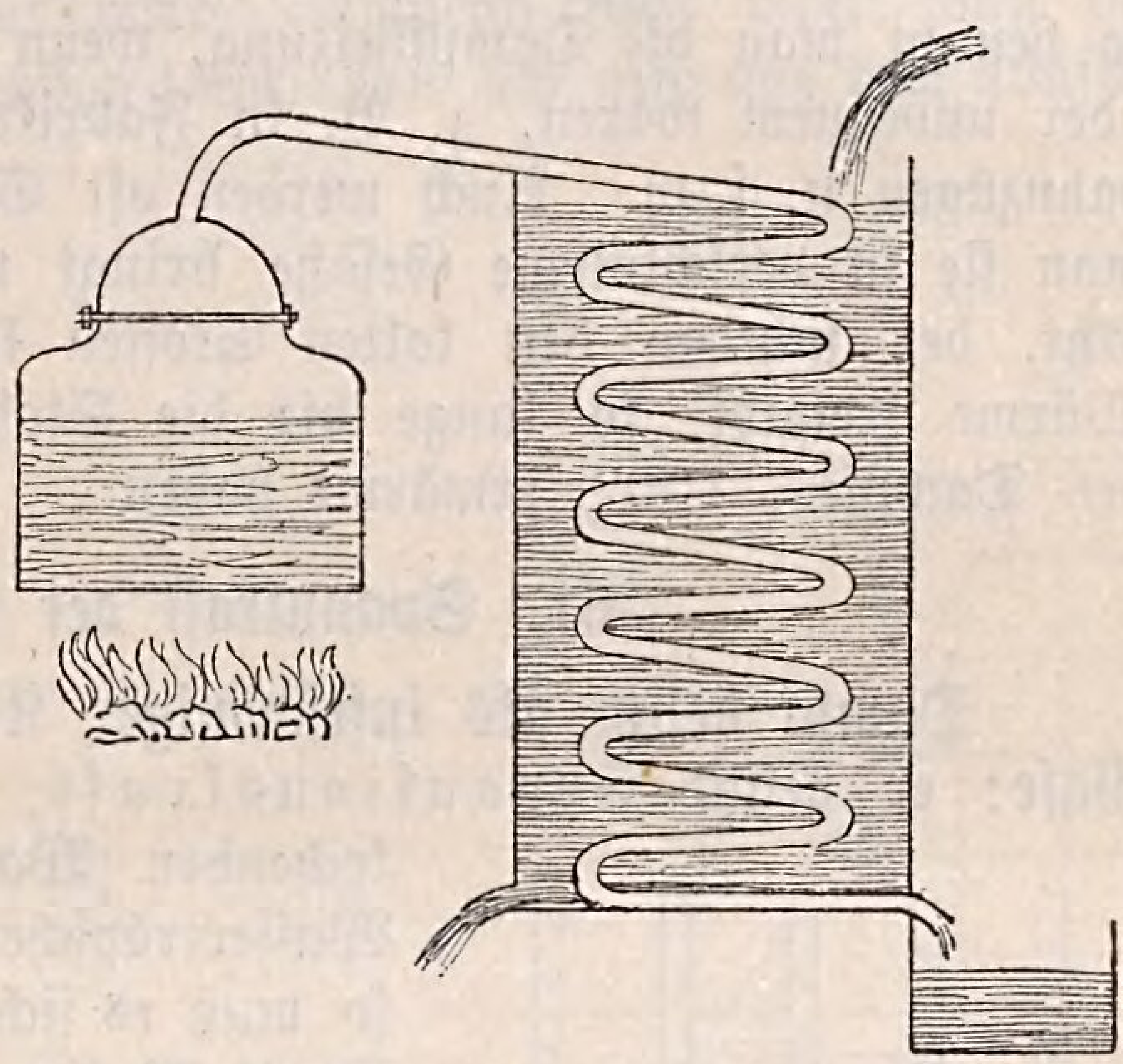


Fig. 78.

Wird nun die Flüssigkeit in der Blase zum Kochen gebracht, so steigen die Dämpfe ins Kühlrohr, werden durch das kalte Wasser des Kühlfasses abgekühlt, und wieder in Flüssigkeit verwandelt, die im Kühlrohre nach abwärts in die Vorlage läuft.

Man destilliert Wasser, um es zu reinigen; denn Brunnen-, Fluß- und Meerwasser enthalten viele fremde Bestandteile aufgelöst. Da nun beim Kochen sich bloß das Wasser in Dampf verwandelt, die fremden Bestandteile aber als feste Körper in der Blase bleiben, so ist das kondensierte Wasser ganz rein. Auch das Regenwasser ist destilliertes und deshalb ganz reines Wasser, jedoch nimmt der Regentropfen beim Herabfallen Staubteilchen aus der Luft mit. Der Apotheker, Chemiker und sonst noch mancher Gewerbetreibende braucht solches destilliertes Wasser. Aus Meerwasser oder verdorbenem süßen Wasser destilliert man trinkbares Wasser ab. Spiritus wird gewonnen, indem man mehlhaltige Stoffe, wie Getreide, Kartoffel u. s. w., gähren läßt, und das Gegohrene, das jetzt spiritushaltig ist, destilliert, wobei bloß der Spiritus und etwas Wasser überdestilliert (verdampft), die unvergohrenen Stoffe aber in der Blase zurückbleiben. Ebenso erhält man reines Quecksilber durch Destillation des unreinen, u. s. f.

Wenn ein Dampf sich wieder in Flüssigkeit verwandelt, so gibt er die latente Wärme des Dampfes wieder her, seine Dampfwärme wird wieder frei. Man muß deshalb bei der Destillation im Kühlfasse große Mengen kalten Wassers haben und es rasch erneuern, damit es die frei werdende Dampfwärme aufnehmen kann, ohne zu warm zu werden.

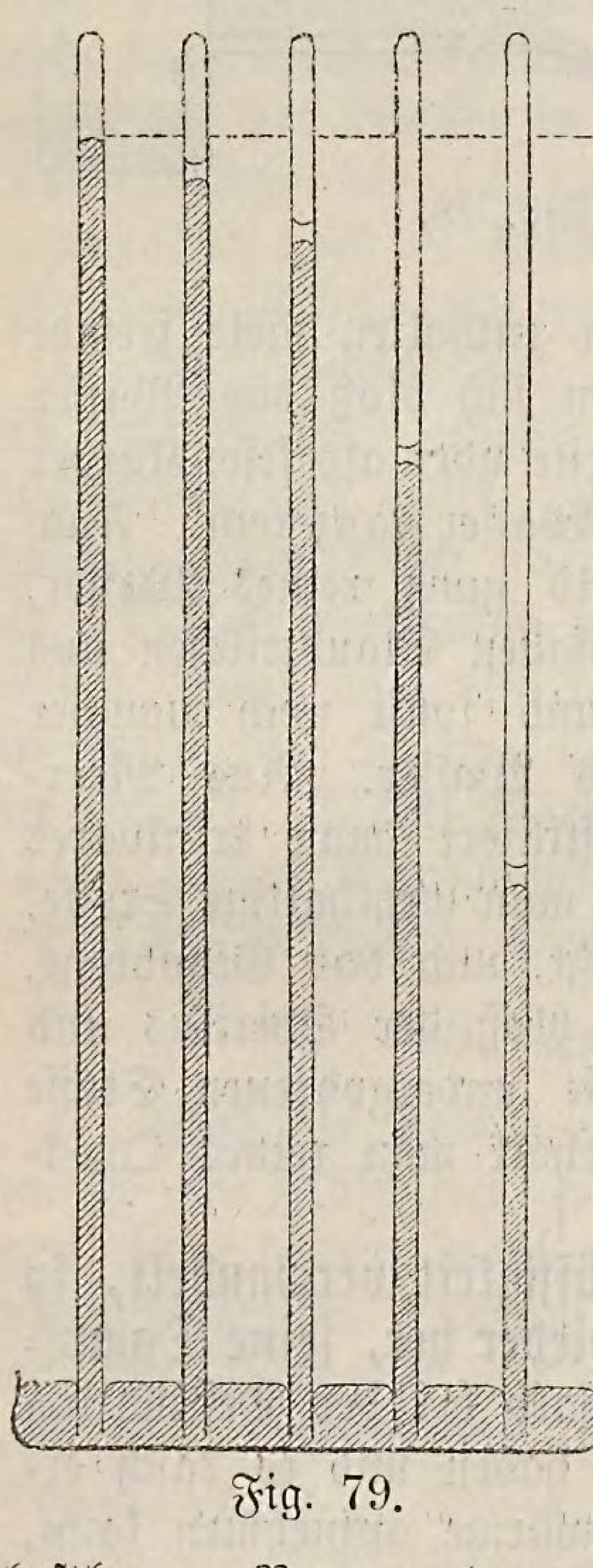
Dampfheizung. Auf dem Freiwerden der Dampfwärme bei der Kondensation beruht auch die Dampfheizung: in einem

Kessel wird Dampf entwickelt, welcher dann in Röhren durch die Räume geleitet wird, die erwärmt werden sollen; er erwärmt die Röhren, und diese geben die Wärme durch Leitung an die umliegende Luft ab; dadurch kondensiert sich der Dampf, indem er seine latente Wärme abgibt; das Kondensationswasser läuft in den Kessel zurück.

Da die Dampfröhren nie mehr als 100° warm werden können, so benützt man die Dampfheizung, wenn gewöhnliche Öfen gefährlich oder unbequem wären, z. B. in Fabriken, Gewächshäusern, Eisenbahnzügen u. s. w. Auch werden oft Stoffe dadurch erwärmt, daß man sie in verschlossene Gefäße bringt und nun Dampf einströmen läßt, der sich an den kalten Stoffen kondensiert und seine latente Wärme freigibt, so lange bis die Stoffe sich auf die Temperatur des Dampfes, 100°, erwärmt haben.

61. Spannkraft der Dämpfe.

Dampf besitzt als luftförmiger Körper die Eigenschaften der Gase: er besitzt Expansionskraft; das ersieht man schon am kochenden Wasser; denn wenn sich ein Wassertröpfchen in Dampf verwandeln soll, so muß es sich, da der Dampf viel leichter ist als Wasser, (1696mal, sp. G. bei 100° = 0,000591) bedeutend ausdehnen, muß deshalb nicht bloß das über ihm liegende Wasser heben, also den Bodendruck des Wassers überwinden, sondern insbesondere den auf dem Wasser liegenden Luftdruck überwinden; der sich entwickelnde Dampf muß also eine Expansivkraft besitzen, die etwas größer ist als 1 Atmosphäre; **an der Oberfläche des Wassers hat der Dampf eine Spannkraft von einer Atmosphäre.**


Fig. 79.

Füllt man eine Glasröhre, wie beim Torricelli'schen Versuche mit Quecksilber, und stellt sie umgekehrt in ein Gefäß mit Quecksilber, so hat man ein gewöhnliches Barometer. Füllt man eine zweite Glasröhre fast ganz mit Quecksilber, den Rest mit Wasser, kehrt sie um, und stellt sie ebenfalls in das Quecksilbergefäß, so hat man ein zweites Barometer, bei welchem sich aber über dem Quecksilber im luftleeren Raume etwas Wasser befindet. Man sieht, daß das zweite etwas tiefer steht, als das erste, ca. $1^1/_2$ *cm*, schließt, daß sich ein Teil des Wassers in Dampf verwandelt hat,

daß dieser den luftleeren Raum erfüllt, einen Druck auf das Quecksilber ausübt, und daß deshalb das Quecksilber tiefer steht. (Dampfbarometer.) Der Druck dieses Dampfes ist aber gering.

Erwärmt man das Wasser im Dampfbarometer, so sinkt das Quecksilber immer tiefer, weil die Spannkraft des Wasserdampfes mit der Erwärmung größer wird. Zugleich sieht man, daß bei rascher Erwärmung das Wasser kocht, daß sich also aus dem Wasser

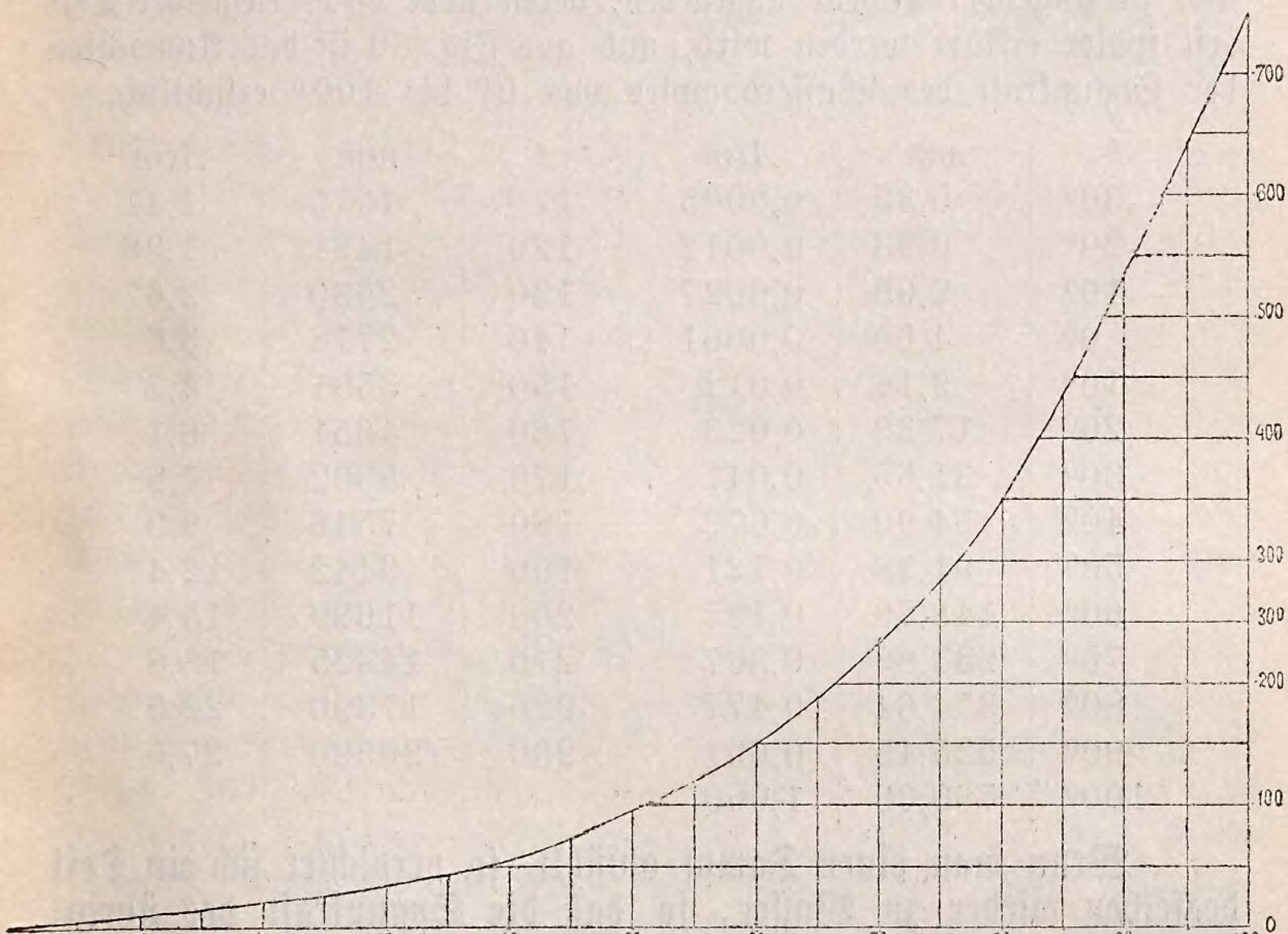


Fig. 80.

neue Dämpfe entwickeln; man schließt also: **Bei der Erwärmung erhalten die Dämpfe eine größere Spannkraft dadurch, daß sich aus dem vorhandenen Wasser noch neue Dämpfe entwickeln, die zu den vorhandenen Dämpfen hinzutreten, dadurch deren Dichtigkeit und deshalb ihre Spannkraft erhöhen.** Ähnliches erkennt man, wenn man noch einige solche Dampfbarometer daneben stellt, in welche zum Quecksilber noch andere Flüssigkeiten, wie Spiritus, Benzin, Schwefeläther u. s. w. gebracht sind; man erkennt, daß das Quecksilber bei ihnen tiefer steht, als beim Wasserdampfbarometer, daß also die Dämpfe des Spiritus u. s. w. bei gleicher Temperatur eine größere Spannkraft besitzen als die Wasserdämpfe. Mit solchen Dampfbarometern ist der vorhergehende Versuch noch leichter anzustellen, ja beim Ätherdampfbarometer ist es leicht, schon durch die Wärme der Hand eine deutlich sichtbare Drucksteigerung

des Ätherdampfes, und ein heftiges Kochen hervorzubringen. Durch genaue Ausführung solcher Versuche findet man die Spannkräfte der Dämpfe bei verschiedenen Temperaturen.

Wasser verwandelt sich, wenn es sich in einem sonst leeren Raum befindet, bei jeder Temperatur in Dampf, dessen Spannkraft und Dichtigkeit von der Höhe der Temperatur abhängt. Die Spannung des Wasserdampfes ist insbesondere von Regnault (früher von Dalton 1766) bei verschiedenen Temperaturen gemessen worden und in folgender Tabelle angegeben, deren über 100° liegender Teil erst später erklärt werden wird, und aus Fig. 80 ist das Anwachsen der Spannkraft des Wasserdampfes von 0° bis 100° ersichtlich.

t	*mm*	*Atm*	*t*	*mm*	*Atm*
—30°	0,39	0,0005	110	1075	1,41
—20°	0,93	0,0012	120	1491	1,96
—10°	2,09	0,0027	130	2030	2,67
0°	4,60	0,0061	140	2718	3,6
10°	9,16	0,012	150	3581	4,7
20°	17,39	0,023	160	4651	6,1
30°	31,55	0,041	170	5962	7,8
40°	54,90	0,072	180	7546	9,9
50°	91,98	0,121	190	9442	12,4
60°	148,79	0,197	200	11689	15,4
70°	233,09	0,307	210	14325	18,8
80°	354,64	0,477	220	17390	22,9
90°	525,45	0,691	230	20926	27,5
100°	760,00	1,000			

Wenn man einen Dampf abkühlt, so verdichtet sich ein Teil desselben wieder zu Wasser, so daß die Spannkraft des übrigbleibenden, also dünneren Dampfes der neuen niedrigen Temperatur entspricht. Auch das findet man am Dampfbarometer bestätigt, denn man sieht bei der Abkühlung das Quecksilber steigen, und kann besonders beim Wasserdampfbarometer ziemlich gut sehen, wie sich die oberen Glaswände mit Wassertröpfchen beschlagen, die davon herkommen, daß sich ein Teil des Dampfes wieder in Wasser verwandelt.

62. Sieden bei niedriger Temperatur.

Jede Flüssigkeit kann bei jeder Temperatur kochen, kocht aber nur dann, wenn der auf der Flüssigkeit lastende Druck kleiner ist, als die Spannkraft der Dämpfe, die sich bei der vorhandenen Temperatur aus der Flüssigkeit entwickeln können. Wasser kann also etwa schon bei 83° kochen, aber nicht, wenn die gewöhnliche Luft auf dem Wasser liegt, sondern nur, wenn man die Luft teilweise weggenommen hat, so daß der Druck der übrigbleibenden Luft

$^1/_2$ Atmosphäre beträgt; denn da das Wasser bei 83° einen Dampf von etwas stärkerer Expansivkraft herzugeben imstande ist, so können sich diese Dämpfe wirklich entwickeln, der Druck der Dämpfe kann den Druck der darüber befindlichen Luft überwinden und das Wasser kocht.

Man findet dies leicht am Dampfbarometer bestätigt, am leichtesten an dem mit Äther versehenen und zwar auf dreifache Art: 1) ich erwärme den noch in der Röhre befindlichen Äther, so kann er Dämpfe entwickeln von höherer Spannkraft, als die oben befindlichen kälteren Dämpfe besitzen; also kocht er. 2) Ich kühle die oben befindlichen Ätherdämpfe ab; das geschieht leicht, wenn man um die Röhre oben etwas Fließpapier wickelt und auf dieses Äther tröpfelt; denn dieser Äther verdampft sehr rasch, verbraucht dabei sehr viel Wärme und kühlt dadurch den obern Teil der Röhre und dadurch die darin befindlichen Ätherdämpfe ab. Durch die Abkühlung kondensieren sich die Ätherdämpfe teilweise, und bekommen eine geringere Spannkraft; aber der Äther in der Röhre, der noch die höhere Temperatur hat, kann noch Dämpfe von höherer Spannkraft hergeben, kocht also. 3) Ich erwärme den Äther in der Röhre und kühle zugleich die Dämpfe in der Röhre durch Aufsetzen der Ätherkappe ab; der Äther in der Röhre kocht dann sehr stark, da nun beide Ursachen zusammenwirken.

Daß auch Wasser bei niedriger Temperatur schon kochen kann, sieht man auch an folgendem hübschen Versuche. Man bringt in eine Kochflasche etwas Wasser, bringt es zum Kochen, läßt es einige Zeit kochen, bis die sich entwickelnden Dämpfe alle Luft aus der Flasche verdrängt haben, verschließt die Flasche mit einem Korke luftdicht, nimmt sie vom Feuer und kehrt sie um. Man sieht nun das Wasser schwach weiter kochen; wenn man aber die Flasche mit kaltem Wasser übergießt, so kocht daß Wasser stark; denn durch das kalte Wasser werden die Dämpfe kondensiert, erhalten einen niedrigeren Druck, während das Wasser in der Flasche noch heiß ist und deshalb noch Dämpfe von hohem Drucke hergeben kann; deshalb kocht es. Auch wenn die Flasche durch fortgesetztes Übergießen mit Wasser sich schon stark abgekühlt hat, kocht das Wasser noch weiter, wenn es nur noch etwas wärmer ist, als das aufgegossene Wasser. Wenn man lauwarmes Wasser in einem Schälchen unter den Rezipienten der Luftpumpe bringt, und rasch evakuiert, so kocht das Wasser. Es war dies der erste Versuch (Robert Boyle 1660), durch den man auf diese merkwürdige Erscheinung aufmerksam wurde.

Wenn der äußere Luftdruck 760 *mm* beträgt, so kann das Wasser in einem offenen Gefäß erst bei 100° kochen, weil erst bei 100° die Spannkraft der Wasserdämpfe 760 *mm* beträgt. Ist aber der Luftdruck geringer, so kocht das Wasser schon bei niedrigerer Temperatur; auf dem Mont Blanc also, wo

der Luftdruck bloß $^1/_2$ Atmosphäre beträgt, kocht das Wasser schon bei 82°. Es ist also der Siedepunkt des Thermometers vom Barometerstand abhängig; will man demnach den Siedepunkt auf der Skala eines Thermometers bestimmen, so muß man den Barometerstand berücksichtigen; ist dieser etwa 725,3 *mm*, so findet man aus einer Tabelle die zugehörige Siedetemperatur = 98,7°: man muß also an den Stand des Quecksilbers nicht 100°, sondern 98,7° schreiben, und darnach die Skala einteilen.

Weil der Siedepunkt des Wassers vom Luftdruck abhängt, so kann man das Thermometer anstatt des Barometers etwa zu Höhemessungen benützen. Man hält das Thermometer in kochendes Wasser, besser in die Dämpfe von kochendem Wasser, findet etwa 87,6°, erfährt aus der Tabelle, daß der dieser Temperatur entsprechende Dampfdruck = 479,2 *mm* ist, und weiß, daß der vorhandene Luftdruck eben so hoch ist, und kann dann aus diesem Luftdruck von 479,2 *mm* auf die Höhe des Berges schließen.

63. Der Vakuumkondensator.

Der Vakuumkondensator oder die Vakuumpfanne dient dazu, das Wasser eines wasserhaltigen Stoffes durch Verdampfen wegzuschaffen, ohne daß man den Stoff auf 100° erwärmen muß. Er ist ähnlich eingerichtet wie ein Dastillierapparat, besteht also aus Kessel mit Helm, Kühlrohr und Kühlfaß, nur endigt das Kühlrohr nicht offen, sondern an sein Ende ist die Vorlage luftdicht angeschraubt, und von der Vorlage führt noch ein Rohr zu einer Luftpumpe.

Die Flüssigkeit z. B. Milch wird in den Kessel gebracht und etwa durch ein Wasserbad erwärmt; zugleich wird durch die Luftpumpe die Luft aus Vorlage, Kühlrohr und Helm entfernt, so daß, da der Luftdruck gering wird, die Milch schon bei niedriger Temperatur, etwa 60° ($^1/_5$ Atmosphäre) zu kochen beginnt: die sich entwickelnden Dämpfe treiben die noch vorhandene Luft vor sich her, so daß sie vollständig durch die Luftpumpe entfernt werden kann. Ist das erreicht, so sperrt man das zur Luftpumpe führende Rohr ab und setzt das Kühlfaß in Thätigkeit; es dauert dann bei fortgesetztem Erwärmen das Kochen der Milch bei niedriger Temperatur fort; denn die Milch hat etwa 60°, gibt also Dämpfe her, deren Spannkraft dieser Temperatur entspricht; im Kühlrohr ist aber etwa bloß eine Temperatur von 40°, folglich haben die dort befindlichen Dämpfe eine niedrigere Spannkraft; deshalb strömen beständig Dämpfe vom Helm ins Kühlrohr und zugleich entwickeln sich einerseits aus der Milch neue Dämpfe während andrerseits die ins Kühlrohr übergetretenen Dämpfe abgekühlt und kondensiert werden; das Kondensationswasser sammelt sich in der Vorlage, und die Milch im Kessel verliert ihr Wasser und wird so kondensiert.

Dies Verfahren benützt man, um gute und billige Milch ihres Wassers zu berauben, so daß sie haltbar und transportabel wird und durch Zusatz von Wasser wieder in gewöhnliche Milch verwandelt werden kann; sie heißt kondensierte Milch; bei 100° kondensiert, würde sie leicht anbrennen und sich auch in eine käsige Masse verwandeln, die sich in Wasser nicht mehr auflöst. Der aus dem Zuckerrohr oder den Zuckerrüben gewonnene Zuckersaft wird auch mit solchen Apparaten bei niedriger Temperatur kondensiert, denn bei 100° würde er die Eigenschaft zu krystallisieren fast vollständig verlieren, sich also nicht mehr in krystallisierten Zucker verwandeln lassen. Eiweiß aus Eiern oder Blut wird auch auf solche Weise kondensiert, seines Wassers vollständig beraubt, so daß es wie arabischer Gummi aussieht, und sich ähnlich wie dieser in Wasser wieder auflöst und in gewöhnliches Eiweis verwandelt; in diesem trockenen Zustande verdirbt es nicht und kann leicht verschickt werden. Bei 100° kann man es nicht kondensieren, da es schon bei 80° hart wird wie ein hartes Ei.

64. Spannkraft der Wasserdämpfe über 100°.

Wenn man Wasser im offenen Gefäße kocht, so steigt seine Temperatur nicht über 100° (genauer: nicht über die dem jeweiligen Luftdruck entsprechende Temperatur); alle weiter zugeführte Wärme wird nicht dazu verwendet, um das Wasser weiter zu erwärmen, sondern bloß dazu, um Wasser in Dampf zu verwandeln; je mehr man Wärme zuführt, desto rascher kocht das Wasser.

Wenn man aber Wasser im geschlossenen Gefäße erhitzt, so daß die entstehenden Dämpfe nicht entweichen können, so wächst durch das Hinzutreten der neu gebildeten Dämpfe die Spannkraft der schon vorhandenen; es liegt also auf dem Wasser ein höherer Druck, als seiner Temperatur entspricht; deshalb hört die Dampfentwicklung etwas auf, und die hinzukommende Wärme wird nun dazu verwendet, um das Wasser weiter zu erwärmen, bis die Temperatur des Wassers höher ist, als der Spannkraft der Dämpfe entspricht; dann entwickelt es wieder Dämpfe, und so geht es fort; jedoch treten diese Vorgänge nicht so sprungweise oder absatzweise auf, sondern folgende Vorgänge gehen Hand in Hand: das Wasser erwärmt sich immer weiter, entwickelt stets Dämpfe, die zu den schon vorhandenen hinzutreten und deren Spannkraft stets so erhöhen, daß sie der Temperatur des Wassers entspricht. **Man kann das Wasser in einem geschlossenen Gefäße über 100° erhitzen, wobei die Spannkraft der Dämpfe immer höher wird.** Die Spannkraft nimmt sogar sehr stark, und später immer rascher zu. Man nennt solches Wasser überhitztes Wasser, solchen Dampf gespannten Dampf. Die Spannkräfte der Wasserdämpfe bei Temperaturen über 100° sind in der Tabelle Seite 118

angegeben. Wenn man statt Wasser irgend eine andere Flüssigkeit in einem verschlossenen Gefäße über ihren Siedepunkt erhitzt, so wächst auch ihre Spannkraft über eine Atmospäre.

Überhitztes Wasser verwendet man im Papin'schen Topf, einem starkwandigen eisernen Topf, dessen Deckel luftdicht aufgeschraubt werden kann. Man füllt ihn mit Wasser und Dingen, die man weichkochen will, die aber beim gewöhnlichen Kochen nicht gut weich werden, z. B. zähem Fleisch; in dem überhitzten Wasser wird es dann besser weich. So kann man Knorpeln und Knochen kochen, daß sie zu Brei zerfallen, und in den Papierfabriken werden starre Lumpen, alte Stricke und Säcke, sogar Holz in solchen Papin'schen Töpfen, die man auch Digestoren nennt, gekocht, so daß sie mürbe werden, leicht in die einzelnen Fasern zerfallen und leicht zu Brei zerrieben werden können, aus dem man dann Papier macht. Diese Digestoren werden nicht mit Wasser gefüllt, sondern nachdem sie mit den Stoffen beschickt und verschlossen worden sind, wird durch eine Röhre aus einem eigenen Kessel gespannter Dampf eingeleitet, von dem zuerst ein Teil an den kalten Stoffen und Kesselwänden kondensiert wird und die Stoffe naß und warm macht, der folgende die Stoffe immer mehr erwärmt bis zu der dem gespannten Dampfe eigenen Temperatur. Auch Dampfheizungen werden oft mit gespanntem Dampfe gespeist, natürlich muß dann das Ende der Leitung verschlossen sein, oder wieder in den Kessel zurückführen, und die Röhren können dann eine Temperatur annehmen, die über 100° liegt, die nämlich der Temperatur der gespannten Dämpfe entspricht, also etwa 152° bei 5 Atm.

Dampfmaschine.

65. Die Dampfkessel.

Die wichtigste Anwendung findet der Dampf bei den Dampfmaschinen. Wir beschreiben zuächst die Dampfkessel, in denen

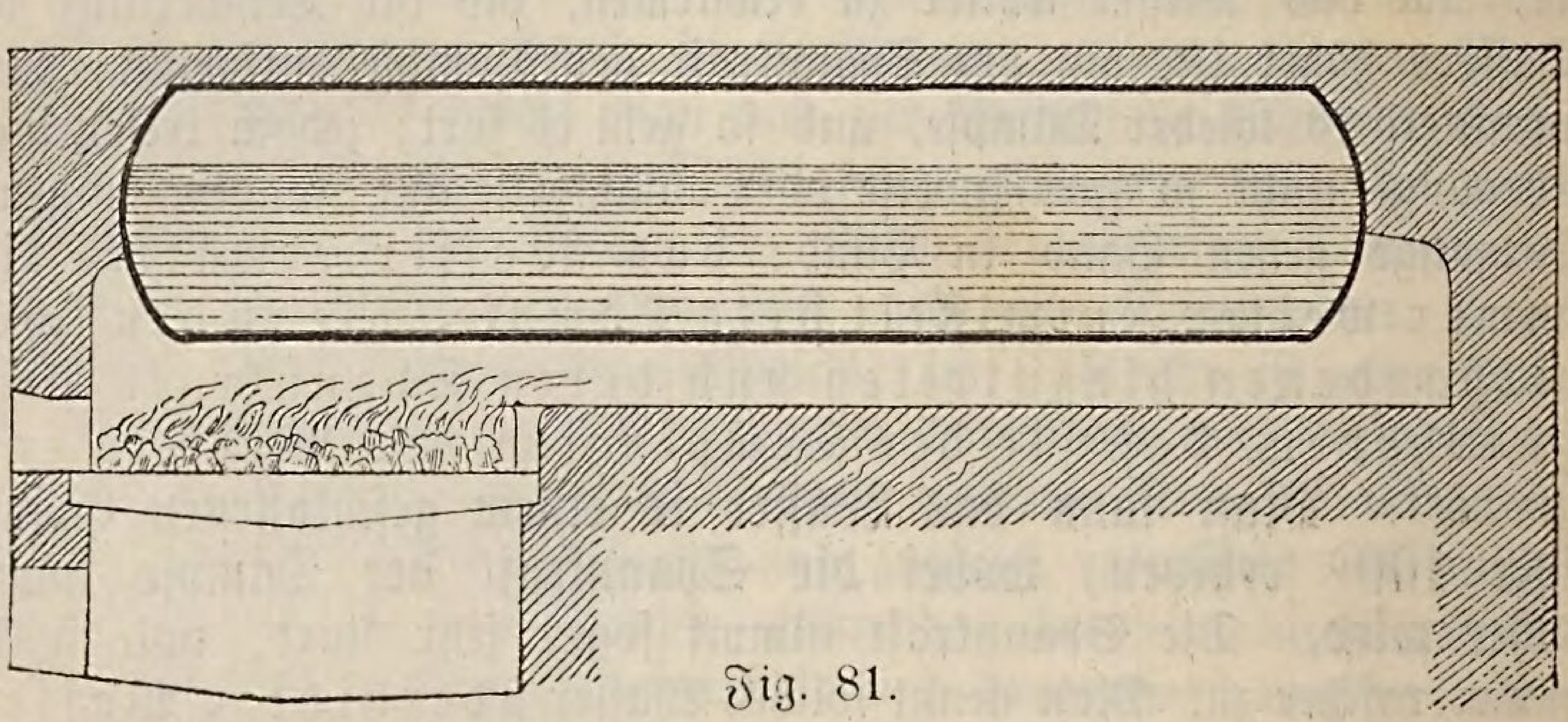


Fig. 81.

der zur Speisung der Maschine erforderliche Dampf entwickelt wird. Es gibt zwei Hauptarten von Dampfkesseln: die eingemauerten Kessel

und die Siedröhrenkessel. Die eingemauerten Kessel, (Kessel mit äußerer Feuerung) Fig. 81 u. 82 bestehen aus einem großen überall verschlossenen Cylinder aus starkem Eisenblech; er liegt horizontal, stützt sich seitlich auf Mauerwerk, und ist oben mit

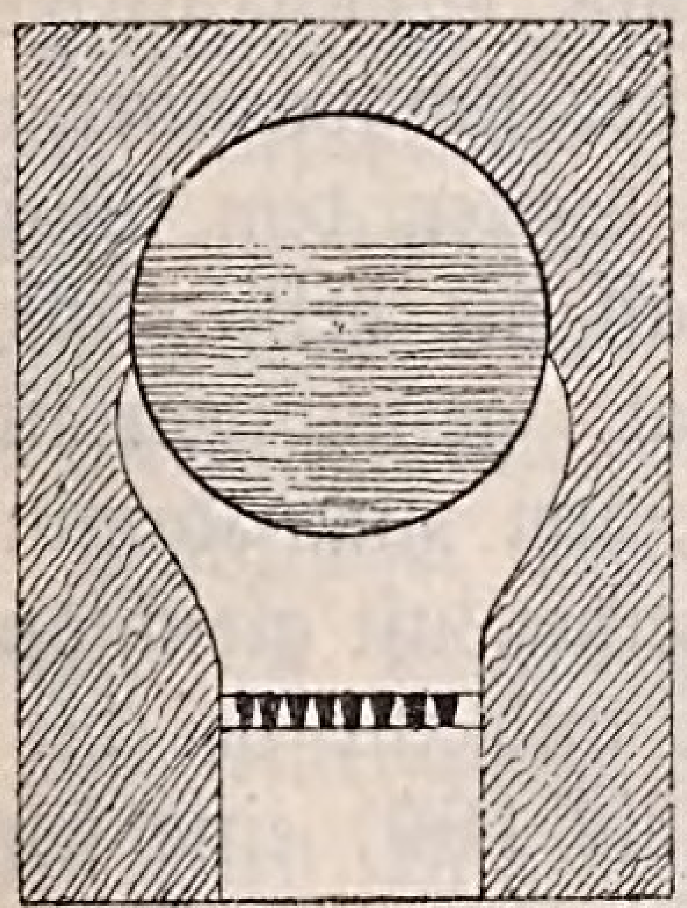


Fig. 82.

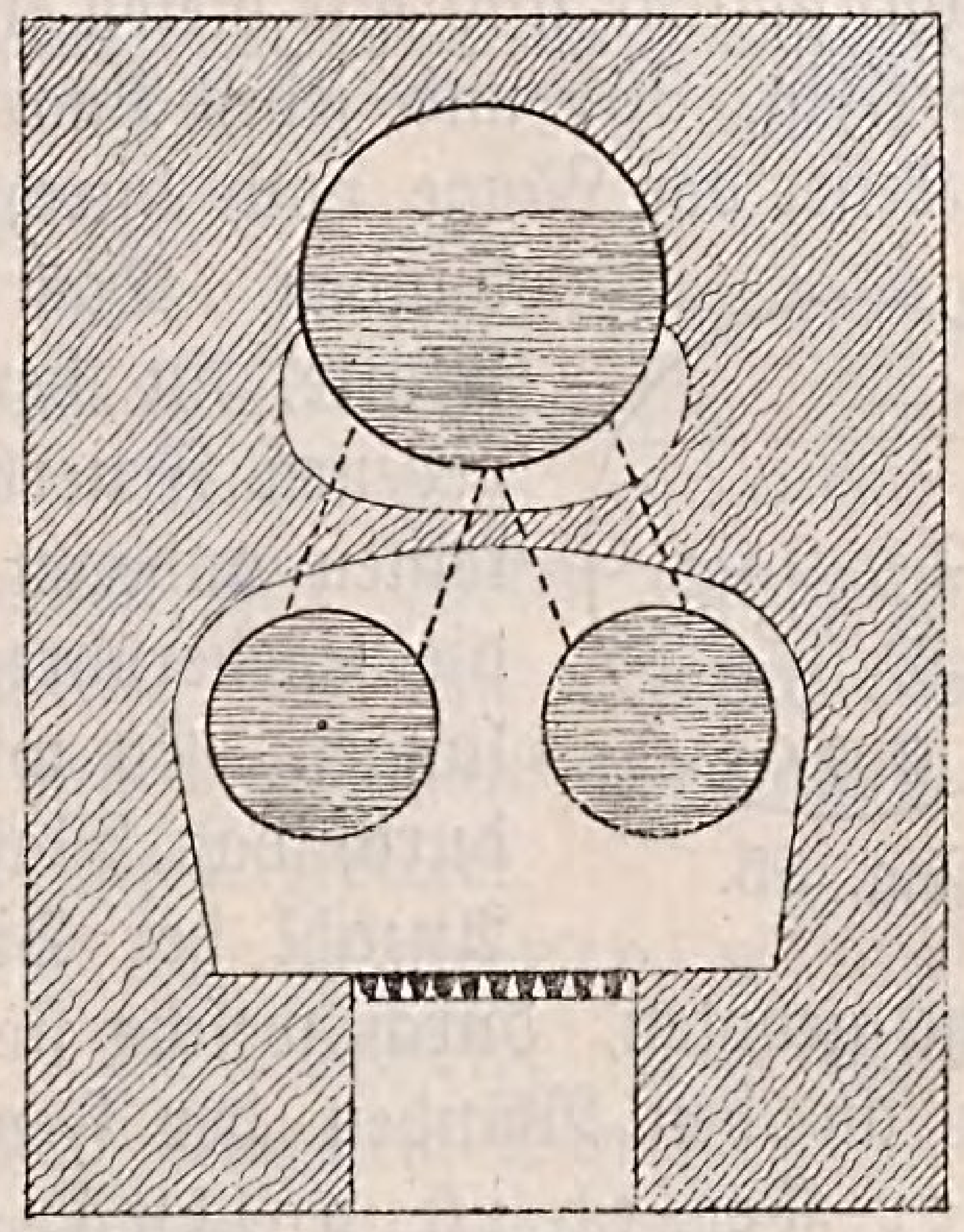


Fig. 83.

schlecht leitenden Steinen eingedeckt; unten ist der Feuerungskanal, an dessen vorderem Teile das Feuer brennt, so daß die heiße Luft die ganze Länge des Kessels bestreicht. Um die vom Feuer bestrichene Fläche des Kessels zu vergrößern, sind oft unterhalb desselben zwei

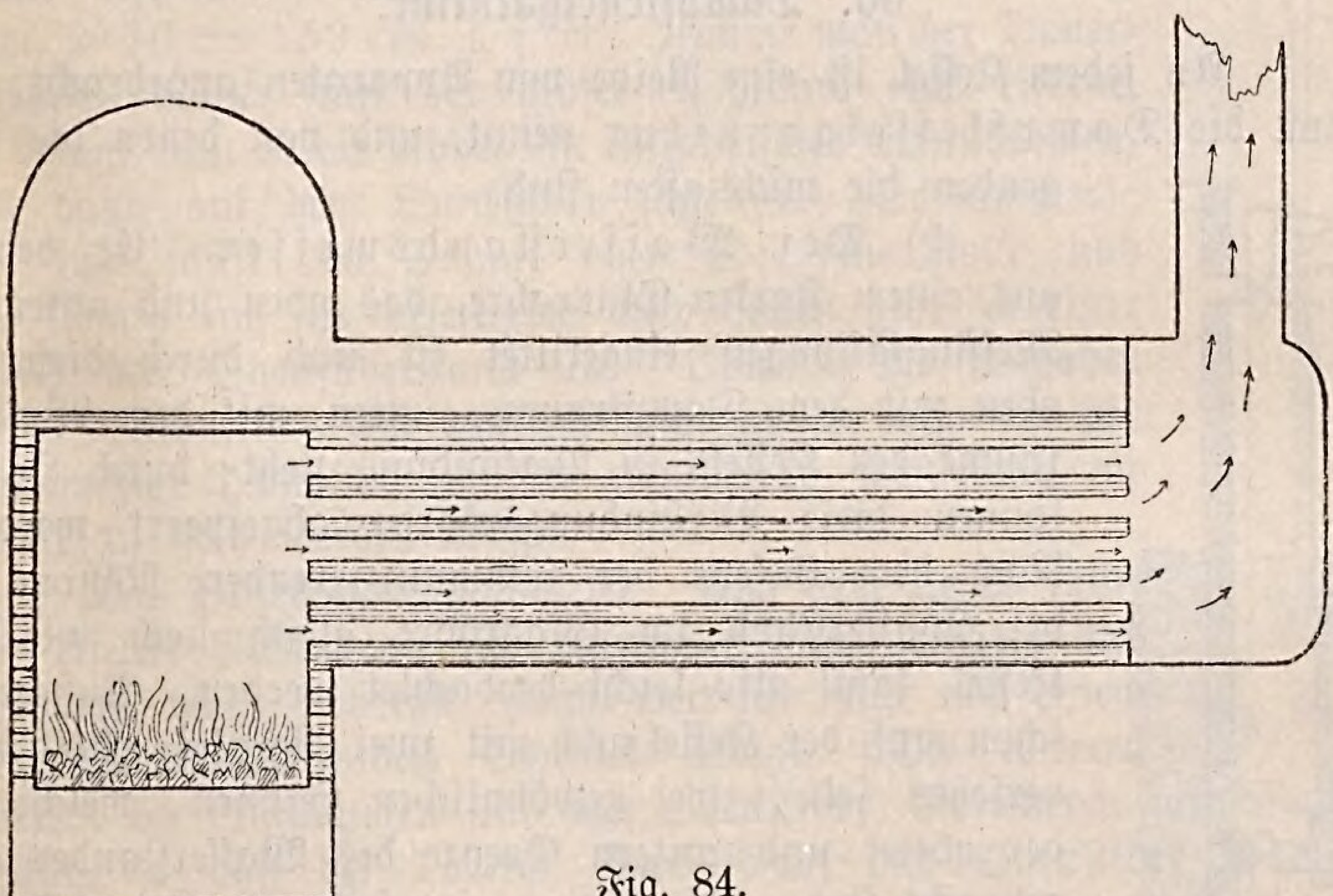


Fig. 84.

kleinere Cylinder parallel dem Kessel angebracht und durch 2 oder 3 aufwärtsführende Röhren mit ihm verbunden (Bouilleurkessel) Fig. 83. Dabei ist die Einmauerung meist so gemacht, daß die heiße Luft vom Feuer zunächst an den zwei Siedröhren entlang streicht und dann längs des Kessels zieht.

Die Siedröhrenkessel (Kessel mit innerer Feuerung) Fig. 84 werden angewandt bei fahrenden oder fahrbaren Maschinen, Lokomotiven, Lokomobilen, auch bei kleineren stehenden Maschinen, weil sie wenig Platz einnehmen. Sie sind cylindrisch geformt, die vordere und hintere Verschlußplatte sind mit vielen symmetrisch angebrachten Löchern versehen (Fig. 85) und jedes Paar entsprechender Löcher ist durch eine den Kessel der Länge nach durchziehende Röhre, Siederöhre, verbunden. Das Feuer befindet sich vor der vorderen Platte, in der von allen Seiten von Wasser umgebenen Feuerbüchse, so daß die heiße Luft, da sie keinen anderen Ausweg hat, gezwungen ist, durch die Siederöhren zu gehen, um zum Kamin zu gelangen. Es wird so die heiße Luft gleichsam mitten durch das Wasser geleitet, und ihr bei der großen Anzahl der Siederöhren (bis 180) eine sehr große Fläche geboten, durch welche sie zum Wasser gelangen kann. Auch schon an den Wänden der Feuerbüchse wird viel Dampf erzeugt. Jeder Kessel ist vollständig verschlossen, also einem Papinschen Topfe vergleichbar; deshalb entwickeln sich in ihm Dämpfe, die eine immer höhere Spannkraft erlangen, während die Temperatur des Wassers und Dampfes entsprechend steigt.

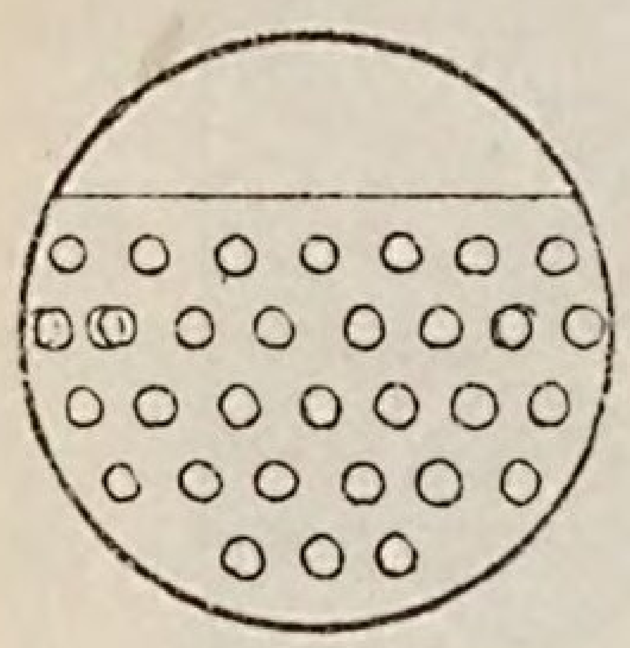


Fig. 85.

66. Dampfkesselgarnitur.

An jedem Kessel ist eine Reihe von Apparaten angebracht, die man die Dampfkesselgarnitur nennt, und von denen die folgenden die wichtigsten sind.

1) Der Wasserstandsmesser. Er besteht aus einem starken Glasrohre, das oben und unten in Messingfassungen eingekittet ist und durch dieselben oben mit dem Dampfraume, unten mit dem Wasserraume des Kessels in Verbindung steht; durch Hähne können diese Verbindungsröhren abgesperrt werden. Nach dem Gesetze der kommunizierenden Röhren ist der Wasserstand im Glasrohre gleich hoch wie im Kessel, kann also leicht beobachtet werden. Außerdem schon muß der Kessel noch mit zwei Probierhähnen versehen sein, zwei gewöhnlichen Hähnen, welche an der obern und untern Grenze des Wasserstandes angebracht sind. Sie dienen einerseits als Kontrolle der Angabe der Wasserröhre, andrerseits als Notbehelf, wenn die Glasröhre zerspringen sollte.

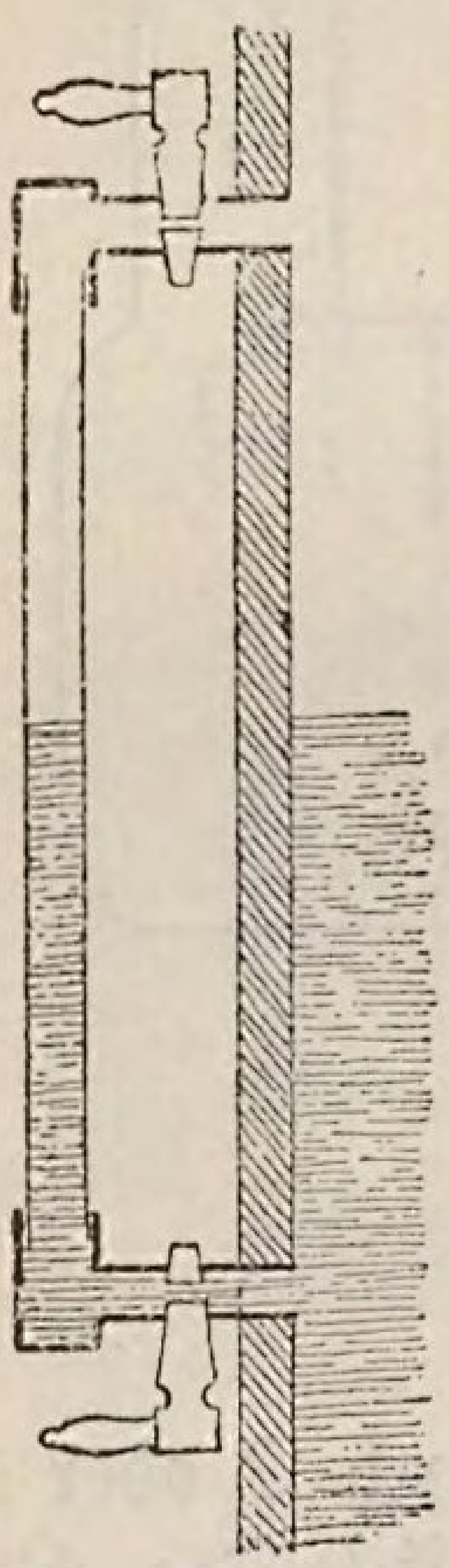
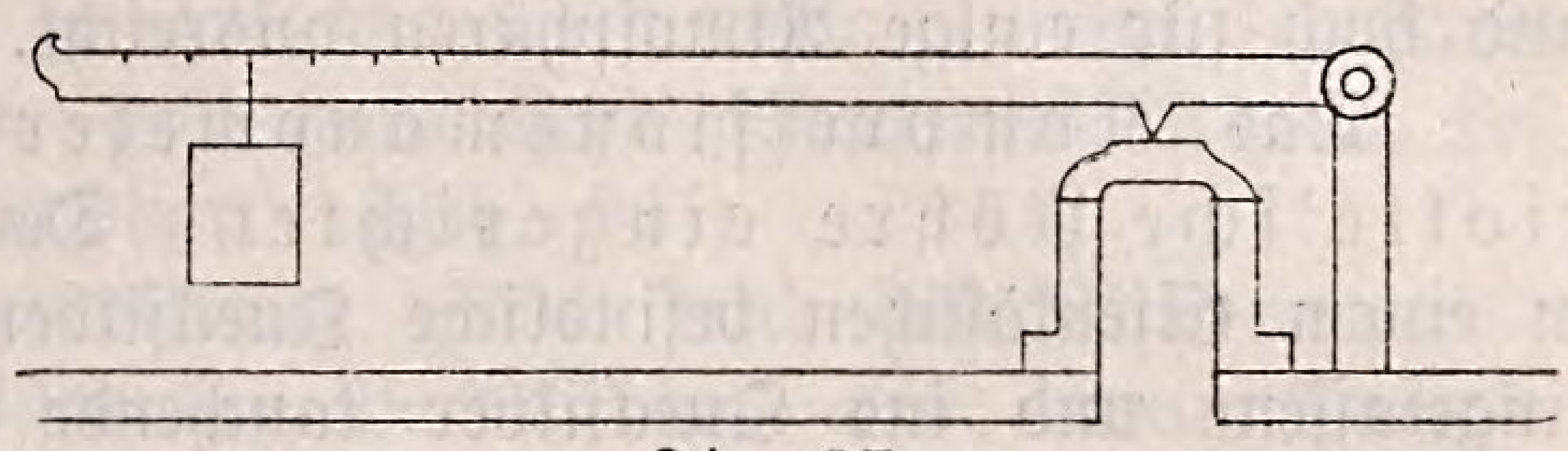


Fig. 86.

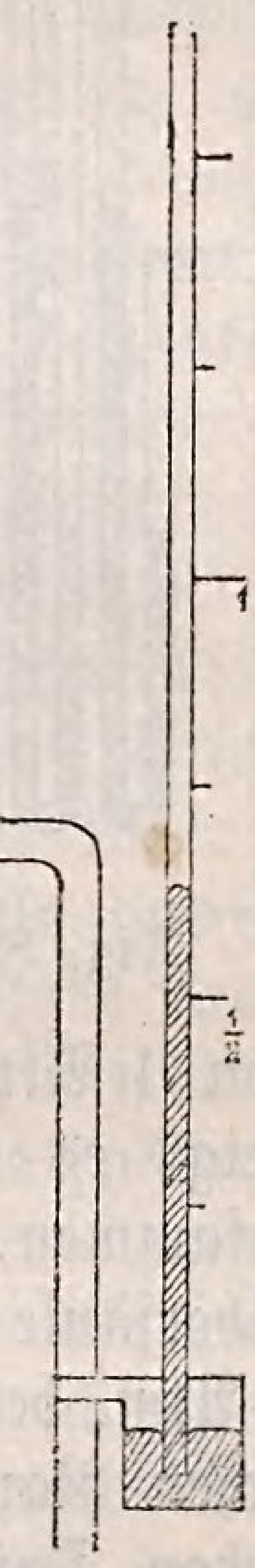
2) Speisepumpe. Eine Druckpumpe, die durch die Maschine selbst getrieben wird, pumpt Wasser in den Kessel als Ersatz für den ausströmenden Dampf. Der Maschinist hat es in der

Hand, die Kolbenhübe größer und kleiner zu machen und dadurch so den Wasserstand zu regulieren.

3) Das Sicherheitsventil, das sich durch den Druck des Dampfes öffnet, wenn der Dampfdruck eine für die Festigkeit des Kessels gefährliche Höhe erreichen sollte. Auf der oberen Kesselwand ist eine kurze Ansatzröhre angebracht; auf ihr befindet sich eine genau passende Messingplatte, die durch einen mit starken Gewichten belasteten Druckhebel niedergedrückt wird. Bei zu großem Dampfdrucke wird die Platte gehoben, so daß der Dampf massenhaft ausströmt und seine große Spannkraft schnell verliert.


Fig. 87.

4) Das Manometer oder der Dampfdruckmesser, wovon es verschiedene Arten gibt. Das offene Quecksilbermanometer oder Freiluftmanometer. Aus dem Dampfraume führt eine Röhre in ein verschlossenes Eisenkästchen, in dem sich Quecksilber befindet; in dasselbe reicht eine in den Deckel des Kästchens luftdicht eingesetzte hohe Glasröhre, in der das Quecksilber um so höher steigt, je höher der Dampfdruck ist, nämlich bei 2 Atmosphären Dampfdruck, also bei 1 Atmosphäre Überdruck 76 *cm*, bei 3 Atm. $2 \cdot 76 = 152$ *cm* u. s. w. Nimmt man der Dauerhaftigkeit halber statt der gläsernen Röhre eine eiserne, so bringt man in die Röhre ein cylindrisches Eisenstäbchen, das dann auf dem Quecksilber schwimmt (Schwimmer); von ihm läuft eine Schnur oben über eine Rolle, und ein kleines an ihr befestigtes Gewichtchen gibt an einer Skala den Quecksilberstand an. Obwohl die Angaben dieses Manometers sehr deutlich sind, ist es doch nur für sehr mäßige Dampfspannungen anwendbar, weil sonst die Röhre zu hoch werden müßte.


Fig. 88.

Das Differenzialmanometer. Aus dem Kessel führt eine eiserne Röhre, die sich mehrmals nach abwärts und aufwärts biegt, überall gleich weit ist und mit einem gläsernen aufsteigenden Schenkel endigt. Die unteren Hälften der Windungen sind mit Quecksilber, die oberen mit Wasser gefüllt, so daß bei 1 Atm. Dampfdruck das Quecksilber in allen Schenkeln gleich hoch steht. Steigt nun der Dampfdruck, so muß, da sich der Druck durch das Wasser auf alle Schenkel fortpflanzt, das Quecksilber in allen abwärtsgehenden Schenkeln sinken und in den aufwärtsgehenden um je ebensoviel steigen. Da aber hiebei nicht bloß eine, sondern mehrere Quecksilbersäulen gehoben werden, so beträgt die Niveaudifferenz in jeder Windung nicht so viel als dem

Überdrucke entspricht, sondern so viel mal weniger als die Anzahl der Windungen beträgt. Es bleibt somit die Steighöhe des Quecksilbers bei großer Windungszahl (bis 8) nur mäßig, weshalb die Höhe der Windungen verhältnismäßig klein genommen werden kann und doch für einige Atmosphären ausreicht. (Fig. 89.)

Das Kompressionsmanometer ist wie eine Mariotte'sche Röhre eingerichtet. Der Dampf drückt auf das in einem Eisenkästchen befindliche Quecksilber; die durch den Deckel eingelassene und ins Quecksilber tauchende Glasröhre ist aber oben geschlossen und mit gewöhnlicher Luft gefüllt. Bei einem Dampfdruck

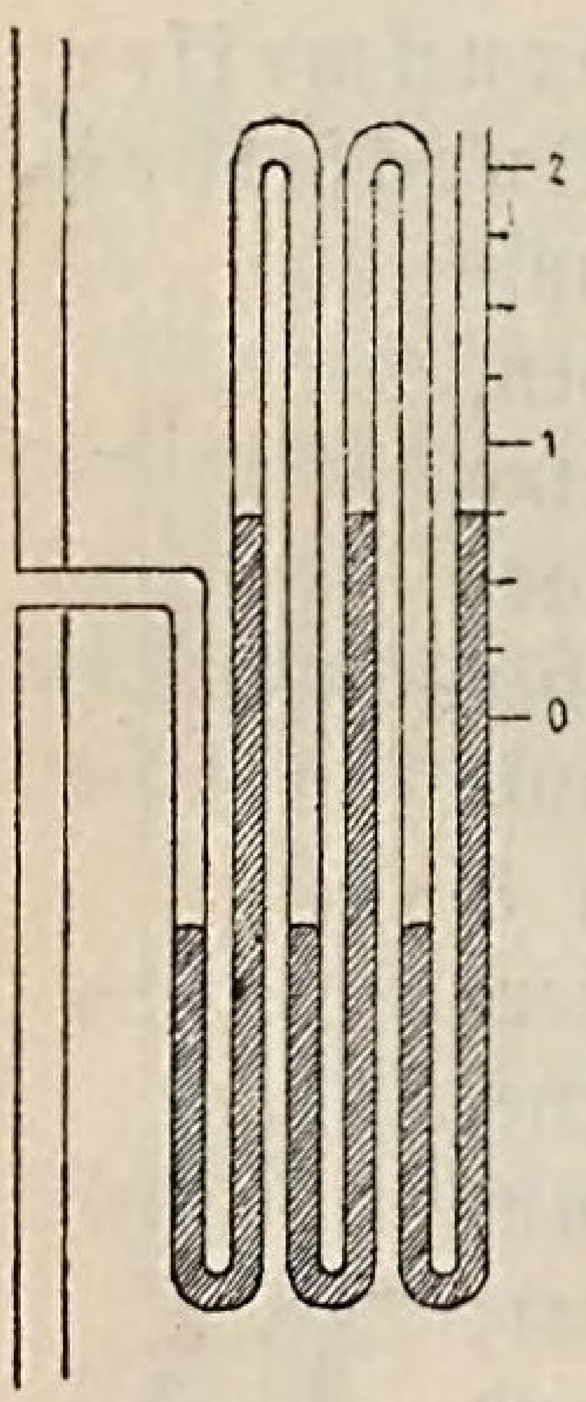


Fig. 89.

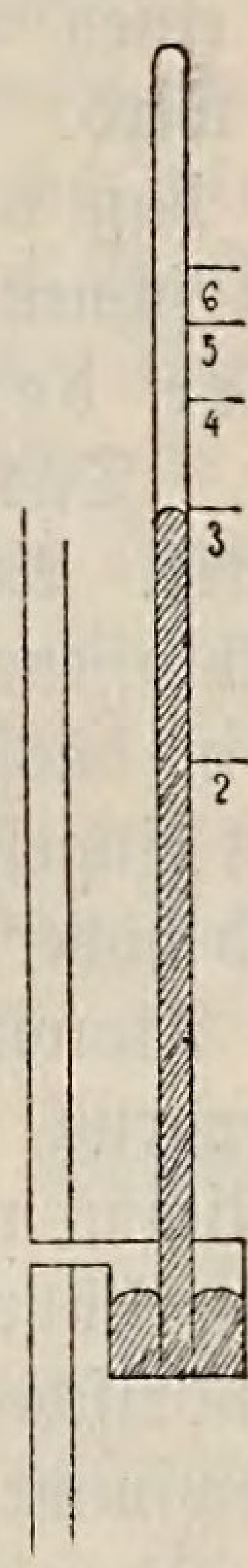
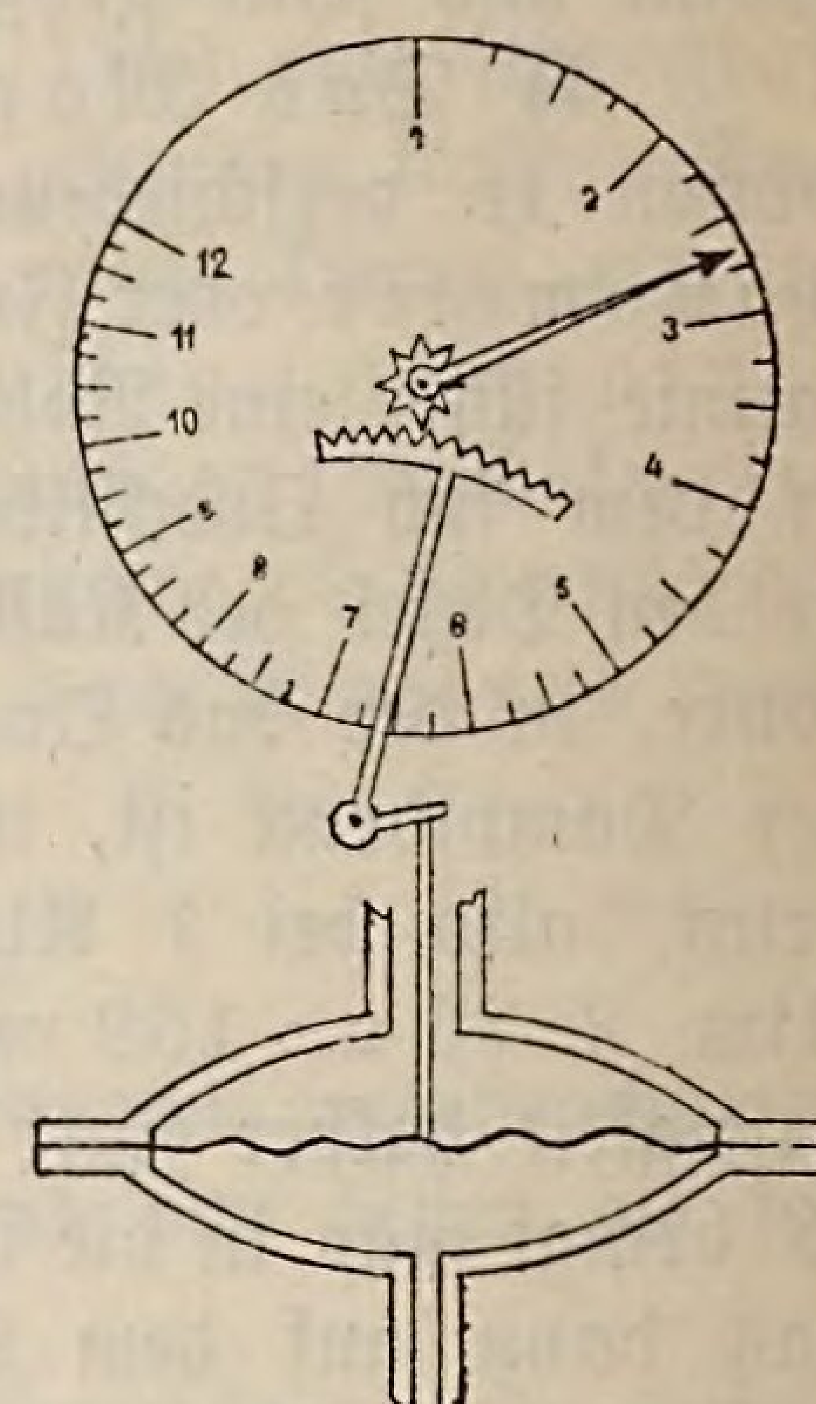


Fig. 90.


Fig. 91.

von 1 Atm. steht das Quecksilber beiderseits gleich hoch, bei 2 Atm. steigt es in der Röhre und preßt die Luft auf den halben Raum zusammen, genauer: so weit, daß der Druck der gehobenen Quecksilbersäule und der Druck der komprimierten Luft zusammen gerade 2 Atm. betragen; bei 3 Atm. auf $^1/_3$, bei 4 auf $^1/_4$ des ursprünglichen Raumes u. s. f. Es ist wenig benützbar, weil besonders bei hohen Drücken die Quecksilberhöhen nur sehr wenig von einander verschieden sind. (Fig. 90.)

Am besten und am meisten angewandt ist das Metallmanometer, das ähnlich wie ein Metallbarometer eingerichtet ist. Ein gewelltes, elastisches Metallblech ist zwischen die Ränder zweier Metallschalen eingeklemmt; von unten drückt der Dampf das Blech nach aufwärts um so höher, je stärker sein Druck ist. Die Bewegung des Bleches, die sehr klein ist, wird nun größer und deutlich sichtbar gemacht, etwa indem der auf der Mitte des Bleches aufsitzende Stift gegen den kurzen Arm eines Winkelhebels drückt,

dessen langer Arm ein Stück eines gezahnten Rades trägt; dies greift in die Zähne eines kleinen Rädchens, das einen Zeiger trägt; dieser spielt auf einer Skala, auf der die Atmosphären direkt beobachtet werden können. Der Apparat ist sehr dauerhaft, geht für höheren Dampfdruck fast so gut wie für niedrigen, läßt $^1/_4$ Atm. noch mit Sicherheit ablesen, geht hinreichend genau und ist auch bei fahrenden Maschinen anwendbar. (Fig. 91.)

5) Zu den Kesselgarnituren gehört noch das Luftventil, ein nach einwärts sich öffnendes Ventil, das also, wenn Dampfspannung vorhanden ist, geschlossen ist; wenn aber der Kessel nicht mehr geheizt wird, sich abkühlt und deshalb der Dampfdruck unter 1 Atm. sinkt, so wird es durch den äußeren Luftdruck geöffnet und Luft strömt in den Kessel.

6) Eine Dampfpfeife, um Signale zu geben.

67. Dampfkesselexplosion.

Wenn ein Dampfkessel aus irgend einer Ursache den Druck des Dampfes nicht mehr auszuhalten vermag, so zerspringt er, es entsteht eine Dampfkesselexplosion. Kesselteile werden dabei nach allen Seiten hinausgeschleudert, das Kesselhaus wird zerstört, heißes Wasser und massenhafter Dampf strömen aus, so daß gewaltige Zerstörungen und meist auch Gefährdung von Menschenleben die Folge sind. Besonders gefährlich sind solche Explosionen auf Dampfschiffen, weil sie meist den Untergang des Schiffes herbeiführen. Ihre Ursachen sind verschiedenartige: 1) teilweise Zerstörung des Kesselbleches durch Rost; der Rost frißt nämlich stellenweise das Kesselblech an, und dringt immer tiefer; man untersucht von Zeit zu Zeit die Festigkeit des Kessels durch Wasserdruck, und sucht nach verrosteten Stellen durch Abklopfen des Kessels mittels eines Hammers mit stumpfer Spitze. 2) Zu niedriger Wasserstand. Das Wasser soll nämlich stets höher stehen, als das Feuer hinaufreicht, (die Wasserlinie soll höher liegen als die Feuerlinie), so daß die dem Kesselblech mitgeteilte Wärme vom Wasser aufgenommen werden kann. Wenn aber durch schlechte Beaufsichtigung der Wasserstand zu nieder geworden ist, so wird ein Streifen des Kesselbleches außen erwärmt, innen aber nicht stark abgekühlt, wird deshalb leicht glühend und schwach, so daß der Kessel dort zerreißt. 3) Bildung von Kesselstein. Zur Speisung des Kessels wird meist Brunnen- oder Flußwasser verwendet; dasselbe enthält stets erd- und steinartige Stoffe aufgelöst, die bei der Verdampfung des Wassers sich ausscheiden und die innere Wand des Kessels mit einer immer dicker werdenden Kruste, dem Kesselstein, überziehen. Je nach der Beschaffenheit des Wassers ist der Kesselstein locker, schwammig, kann leicht entfernt werden und ist dann unschädlich; doch ist er auch, besonders wenn das Wasser viel

Kalk aufgelöst enthält (hartes Wasser), sehr dicht und fest, hart wie Porzellan und schwer zu entfernen; dann heizt sich der Kessel schlecht, weil der Stein die Wärme viel langsamer leitet, und das Kesselblech wird leicht glühend, weil es mit dem Wasser nicht mehr direkt in Berührung steht; an solchen glühenden Stellen springt dann der Kesselstein plötzlich in großen Massen weg, das Wasser trifft auf glühende Metallflächen, und entwickelt plötzlich Dampf von sehr hoher Spannung, der den Kessel zersprengt, bevor das Sicherheitsventil Zeit hatte, sich zu öffnen. All diese Ursachen kann man durch gehörige Beaufsichtigung und Instandhaltung der Kessel vermeiden. Das ist nicht der Fall bei 4) der Verzögerung des Siedepunktes. Wenn man luftfreies Wasser in verschlossenem Gefäße erhitzt, ohne das Gefäß merklich zu erschüttern, so wächst oft die Temperatur des Wassers rascher als die Spannkraft der Dämpfe; bei Eintritt einer Erschütterung liefert dann das Wasser plötzlich Dampf von einer Spannkraft, die seiner Temperatur entspricht. Man erklärt dies auch in folgender Art. Ist der Kessel angeheizt, so liegt das Wasser unter dem Druck des Dampfes und kann nicht kochen. Läßt man aber nun plötzlich und auf einmal Dampf ausströmen, so verringert sich momentan der Dampfdruck, alle Wasserteilchen suchen auf einmal sich in Dampf zu verwandeln, verstärken dadurch gegenseitig ihre Kraft und sprengen so den Kessel. Man glaubt so manche sonst nicht erklärbare Explosionen erklären zu können; doch kommen solche selten vor.

68. Die atmospärische Dampfmaschine.

Die erste praktisch verwendete Dampfmaschine wurde von Newcomen und Cawley 1705 konstruiert, und fand bald Verbreitung, insbesondere um das Grubenwasser aus Bergwerken zu entfernen. Sie hat folgende Einrichtung: In einem vertikal stehenden Cylinder befindet sich der luftdicht anschließende Kolben; er ist durch eine Kette an einem Hebel befestigt, an dessen anderem Arme durch eine zweite Kette die Pumpenstange einer Saugpumpe befestigt ist. Durch ein Übergewicht wird die Gesamtbelastung auf Seite der Pumpe etwas größer germacht als auf Seite des Kolbens.

Wenn nun der Dampfkolben sich unten befindet, wird durch ein Rohr der Dampf in den Cylinder geleitet; der Dampf hat einen Druck von einer Atmosphäre, trägt also den auf dem Kolben lastenden Luftdruck, weshalb der Pumpenkolben das Übergewicht bekommt und nach abwärts geht; hiebei füllt sich der Dampfcylinder mit Dampf. Nun wird das Dampfzuleitungsrohr abgesperrt, und ein anderes Rohr geöffnet, das auch unten in den Cylinder mündet, und von einem mit kaltem Wasser gefüllten, etwas höher stehenden Reservoir herkommt. Es spritzt dann durch die mit vielen kleinen Löchlein versehene Mündung dieses Rohres das Wasser fein zerteilt

in den Dampf und kühlt ihn ab; dadurch kondensiert er sich und bekommt eine niedrige Spannkraft, etwa $^1/_8$ Atmosphäre (51°). Auf die obere Fläche des Kolbens drückt aber die äußere Luft mit 1 Atmosphäre, also mit einem Überdruck von $^7/_8$ Atm.; dieser Druck bewegt den Kolben nach abwärts und hebt dadurch den Kolben der Pumpe und dadurch das Wasser. Ist der Kolben

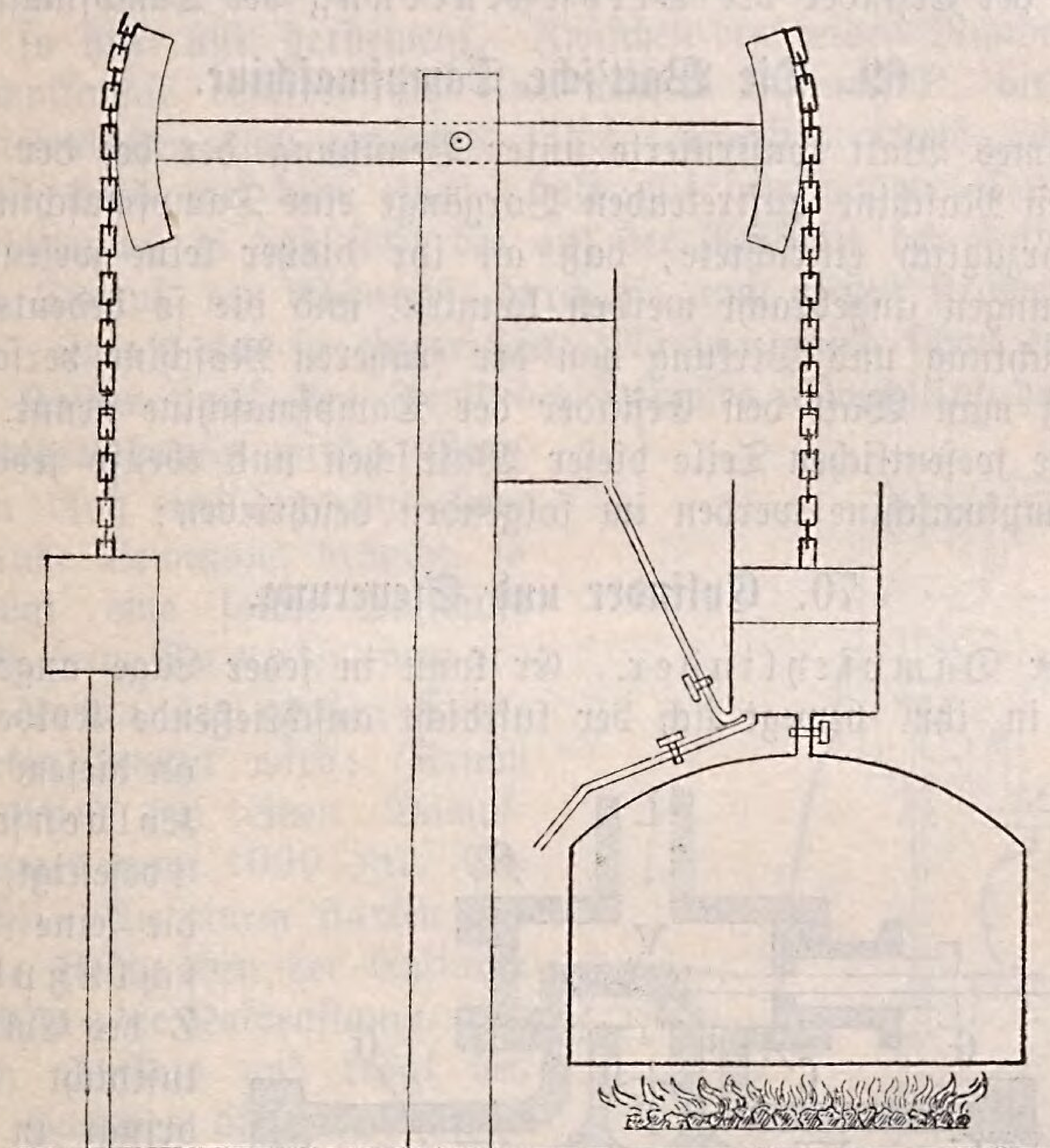


Fig. 92.

unten angelangt, so läßt man durch eine dritte kurze Röhre das im Cylinder befindliche Wasser ablaufen, und beginnt wieder von neuem, läßt also wieder Dampf einströmen u. s. w. Da bei diesen Maschinen nicht der Druck des Dampfes eigentlich die Arbeit leistet, sondern der äußere Luftdruck, so nennt man sie auch atmosphärische Maschinen; der Dampf ermöglicht, durch seine Kondensation einen luftleeren Raum, richtiger, einen Raum von geringem Drucke herzustellen.

Die Maschine hatte große Mängel: sie ist nur einfach wirkend, da sie nur beim Hinabgehen des Kolbens wirkt; sie verbraucht zu viel Dampf; denn wenn der Dampf einströmt, ist auch der Kolben und die Cylinderwand abgekühlt; diese kondensieren also einen Teil des einströmenden Dampfes, bis sie durch dessen frei werdende latente Wärme wieder warm genug geworden sind. Schließlich war zur

Bedienung der Maschine eine Person nötig, die immer die Hähne auf und zu machen mußte; diesem letzten Übelstand war aber bald abgeholfen durch die Erfindung eines Knaben, dem man diese langweilige Arbeit übertragen hatte. Er befestigte Schnüre an dem Hebel und den Hähnen, so daß der Hebel, wenn er sich bewegte, an den Schnüren zog und so die Hähne auf oder zu machte. Dieser Knabe wurde so der Erfinder der Selbststeuerung der Dampfmaschinen.

69. Die Watt'sche Dampfmaschine.

James Watt konstruierte unter Benützung der bei der atmosphärischen Maschine auftretenden Vorgänge eine Dampfmaschine, die er so vorzüglich einrichtete, daß an ihr bisher keine wesentlichen Verbesserungen angebracht werden konnten, und die so bedeutend in der Einrichtung und Wirkung von der früheren Maschine verschieden war, daß man Watt den Erfinder der Dampfmaschine nennt.

Die wesentlichen Teile dieser Watt'schen und ebenso jeder andern Dampfmaschine werden im folgenden beschrieben:

70. Cylinder und Steuerung.

Der Dampfcylinder. Er kann in jeder Lage angebracht werden; in ihm bewegt sich der luftdicht anschließende Kolben K; an diesem ist die Kolbenstange S befestigt, welche die eine Verschlußplatte Z des Cylinders luftdicht durchdringt in einer Stopfbüchse B.

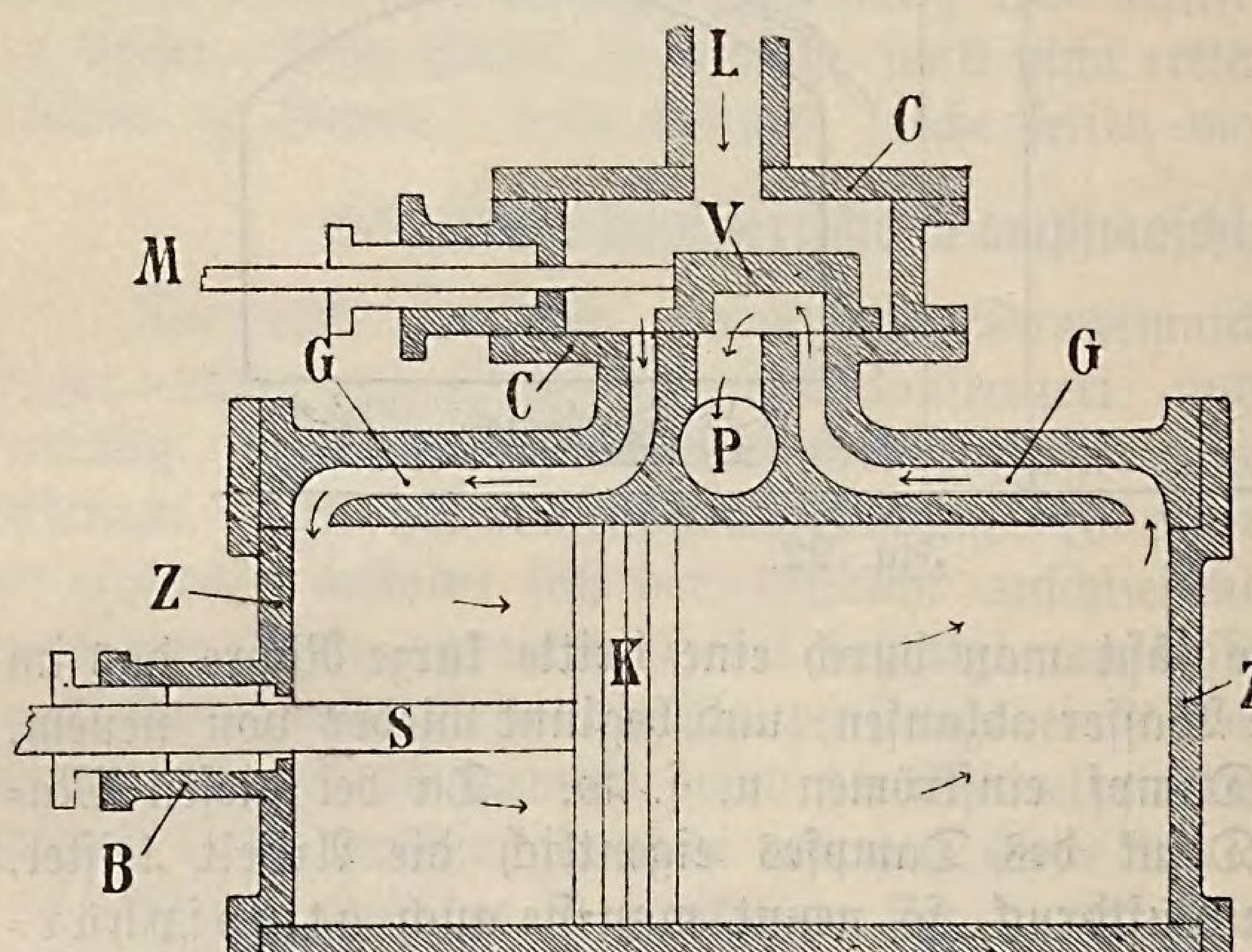


Fig. 93.

Auf dem Cylinder sitzt der Schieberkasten C, in welchen der Dampf durch das Dampfzuleitungsrohr L geleitet wird; vom Schieberkasten führen zwei breite Röhren G zu den Enden des Cylinders, so daß der Dampf auf beiden Seiten des Cylinders einströmen kann. Der Dampf soll aber nicht gleichzeitig auf beiden Seiten, sondern abwechselnd erst auf der einen, dann auf der andern Seite des Cylinders einströmen. Dies wird bewirkt

---

James Watt lebte 1736—1819; die erste Dampfmaschine wurde fertig 1784.

durch das Schieberventil V; das ist ein kleines im Schieberkasten befindliches Kästchen, welches so steht, daß es die eine Röhre verdeckt, und dann mittels einer nach außen führenden Stange, der Schieberstange M, so verschoben werden kann, daß es die andere Röhre verdeckt. **Durch die Stellung des Schieberventils kann der Dampf gesteuert, das heißt so geleitet werden, daß er bald auf die eine, bald auf die andere Seite des Kolbens drückt, und ihn so hin- und herbewegt.** Zwischen den beiden Mündungen dieser Dampfkanäle befindet sich eine weitere Öffnung P, die durch den Schieberkasten nach auswärts führt. Sie steht durch das Schieberventil bald mit dem einen, bald mit dem andern Dampfkanal in Verbindung, so daß stets der auf der Rückseite des Kolbens befindliche Dampf, der Abdampf, durch sie nach außen strömen kann.

Durch eine so eingerichtete Maschine wird schon erreicht, daß der Kolben durch den Druck des Dampfes abwechselnd vorwärts und rückwärts bewegt wird. Wenn man bloß eine hin- und hergehende Bewegung braucht, so genügt eine solche Maschine z. B. beim Dampfhammer, wie er in den großen Eisenwerken benützt wird; (Krupp in Essen hat einen Dampfhammer von 1000 Ztr. Gewicht). An einem starken Gerüste steht oben der Cylinder vertikal, die Kolbenstange geht nach abwärts und trägt den als Hammer dienenden Eisenblock, unter welchem sich der Amboß befindet. Man läßt durch Öffnen des Ventils den Dampf unter den Kolben einströmen, so wird der Kolben und somit der Hammer gehoben; nun läßt man den im Cylinder befindlichen Dampf in die freie Luft hinausströmen, dann fällt der Hammer durch sein Gewicht herab. Bei einem Kolbendurchmesser von 40 *cm* und einem Dampfdruck von 8 Atm. darf das Gewicht des Hammers nebst Kolbenstange und Kolben 170 Ztr. betragen. Man bekommt einen guten Einblick in die mächtige Wirkung des Dampfes, wenn man sich vorstellt, wie der schwere Hammer durch die Kraft des Dampfes gehoben und schwebend

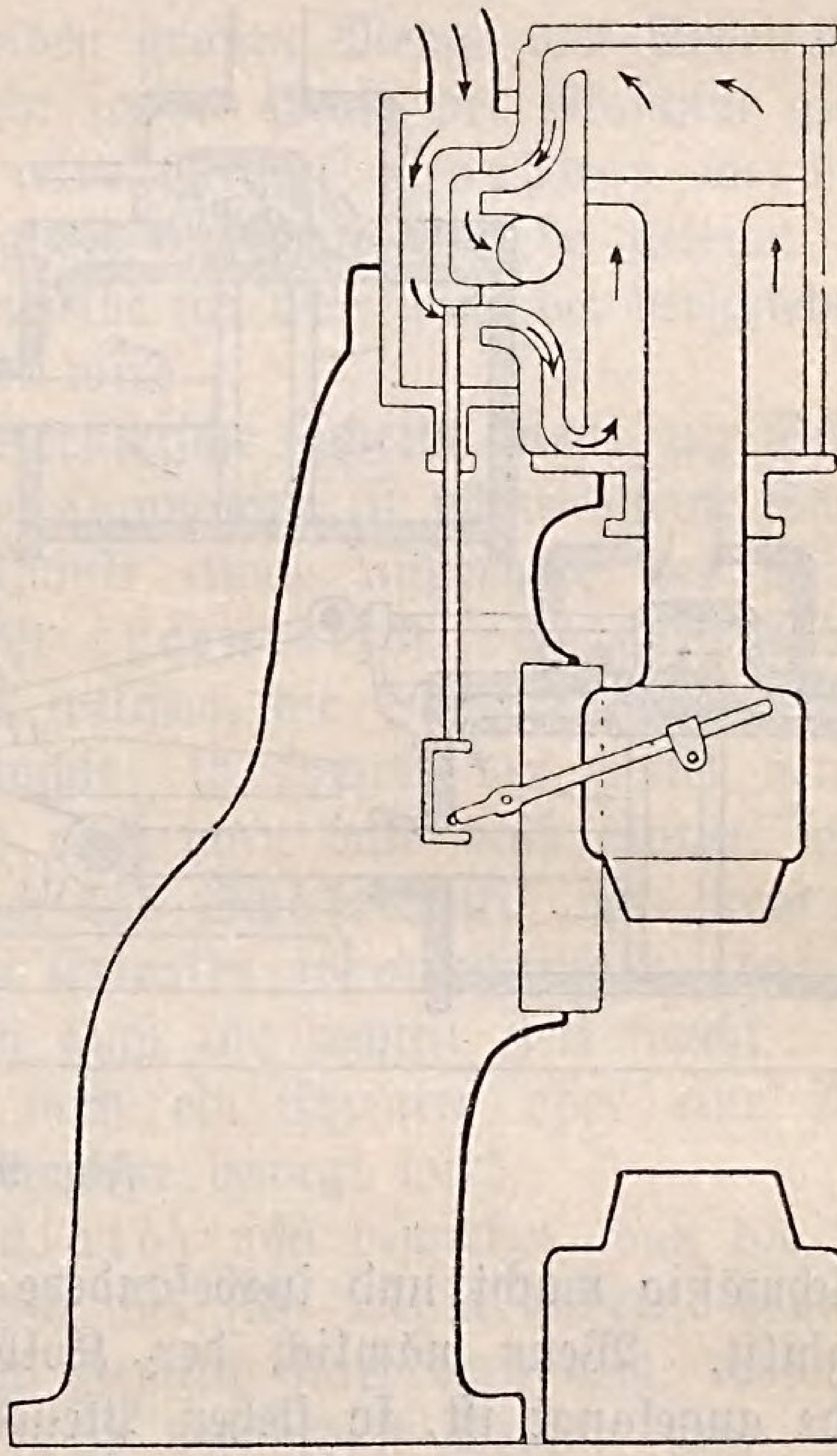


Fig. 94.

erhalten wird. Eine ähnliche Einrichtung hat die Dampframme, durch welche Pfähle bei Wasserbauten in den Boden geschlagen werden; der Dampf wird in einem unten stehenden transportabeln Siederöhrenkessel erzeugt.

Bei den meisten Anwendungen der Dampfmaschine wünscht man aber eine umdrehende (rotierende) Bewegung, und es wird dann die hin- und hergehende (oscillierende) Bewegung des Kolbens in eine rotierende auf folgende Weise verwandelt. Die Kolbenstange ist mit ihrem Ende beweglich mit einer Schub- oder Pleuelstange verbunden, und diese greift an einer Kurbel an, welche an der Achse, der Hauptachse der Maschine, angebracht ist. Wenn nun der Kolben hin- und herbewegt wird, so wird dadurch die Achse umgedreht.

Auf dieser Hauptachse ist meist ein Schwungrad angebracht, ein sehr großes und schweres Rad, das den Gang der Maschine

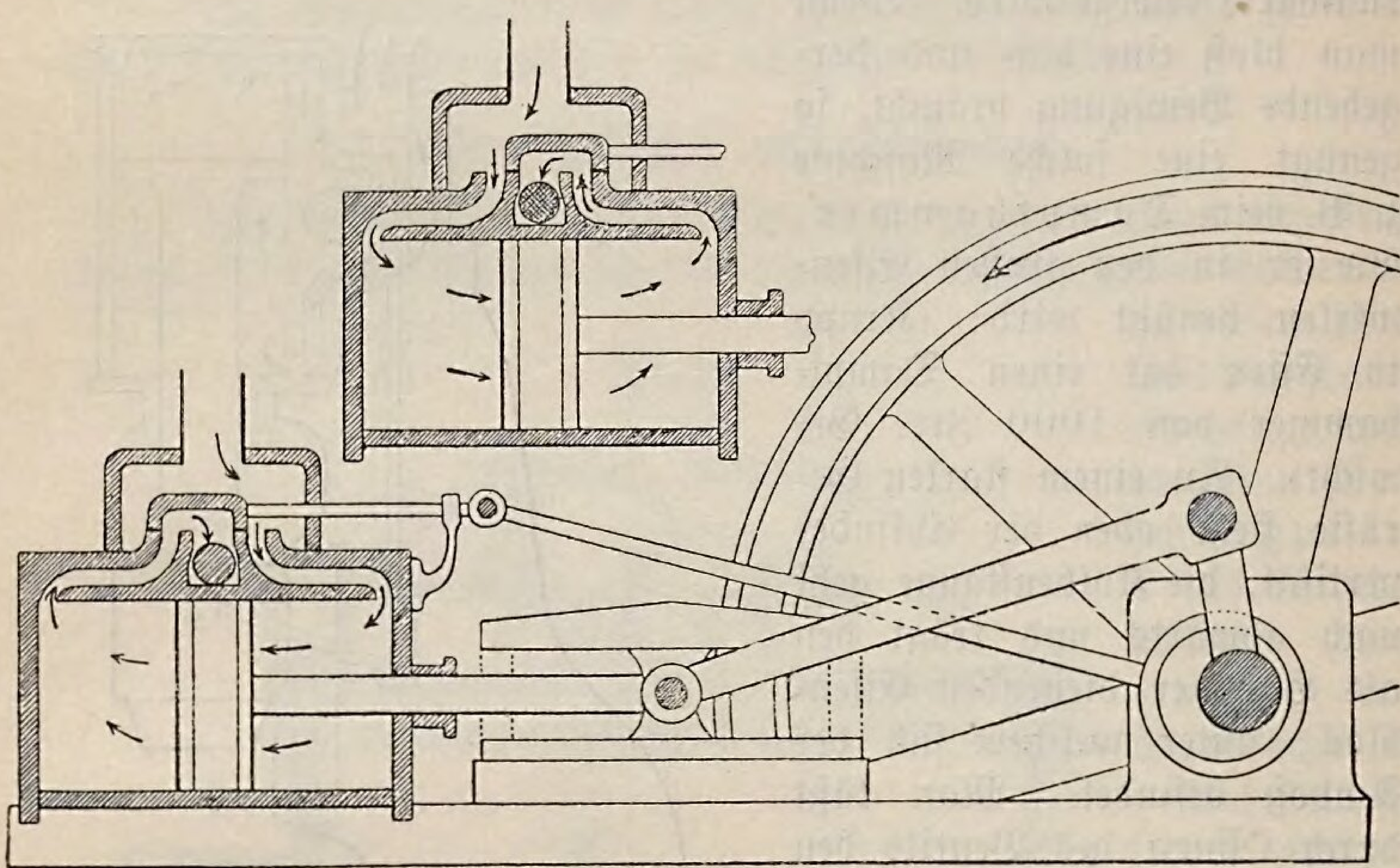


Fig. 95.

gleichmäßig macht und insbesondere über die toten Punkte hinweghilft. Wenn nämlich der Kolben am vorderen oder hinteren Ende angelangt ist, so stehen Pleuelstange und Kurbel in derselben Richtung; es kann also die Kraft des Kolbens nicht umdrehend wirken, und zudem hat der Dampf in dieser Stellung meistens keine Kraft, weil hiebei das Schieberventil eben umgestellt oder verschoben wird. Jede solche Stellung der Maschine nennt man einen toten Punkt; das Schwungrad bewegt sich aber, auch wenn die Kurbel in einem toten Punkte ist, infolge seines Beharrungsvermögens weiter, hilft also der Maschine über den toten Punkt hinweg.

Das Schwungrad muß ferner den Gang der Maschine gleichmäßig machen. Die Kraft des Dampfes wirkt nämlich wegen der verschiedenen Stellungen der Pleuelstange gegen die Kurbel sehr ungleich, im toten Punkte gar nicht, dann wachsend bis gegen die Mitte zu, dann abnehmend bis zum nächsten toten Punkt; zudem ist bei jeder Maschine die Kraft des Dampfes bald stärker, bald etwas schwächer, und auch die von der Maschine zu leistende Arbeit bald größer, bald kleiner. All das würde den Gang der Maschine sehr ungleich machen. Das Schwungrad aber wirkt durch seine sehr große Masse ausgleichend; wirkt nämlich die Kraft stärker, so wird auch das Schwungrad beschleunigt; aber wegen seiner großen Masse wächst seine Geschwindigkeit nur allmählich und langsam; ebenso, wenn die Kraft geringer oder die Arbeit größer wird, so daß die Maschine langsamer gehen muß, so muß auch das Schwungrad langsamer werden; aber wegen seiner großen Masse nimmt seine Geschwindigkeit nur allmählich und langsam ab, indem es nur einen kleinen Teil der in ihm liegenden großen Menge von Arbeitskraft hergibt. Das Schwungrad macht so den Gang der Maschine gleichmäßig. Vom Schwungrad aus wird durch Zahnräder oder durch die Treibriemen die Bewegung auf eine Welle geleitet, die Hauptwelle, von der aus dieselbe zur Bewegung der verschiedenen Arbeitsmaschinen verwendet wird.

Der Excenter oder die excentrische Scheibe dient zur Selbststeuerung des Dampfes. Auf der Hauptachse ist nämlich eine Scheibe so angebracht, daß ihr Mittelpunkt etwas außerhalb des Mittelpunktes der Hauptachse liegt, also excentrisch. Um diese Scheibe ist ein Messingring gelegt, an welchem die Schieberstange befestigt ist; dreht sich nun die Hauptachse, so kommt der weiter herausragende Teil des Excenters bald nach vorn bald nach hinten, schiebt also den Ring, und damit auch das Schieberventil vor- und rückwärts, und es ist leicht, den Excenter so anzubringen, daß das Schieberventil seine Bewegungen auch zur rechten Zeit macht.

An der Hauptachse ist noch ein Excenter oder eine kleine Kurbel, durch welche die Speisepumpe bewegt wird.

Der Centrifugalregulator soll bewirken, daß die Maschine in ihrer Geschwindigkeit sich nur sehr wenig ändert, wenn der Dampfdruck im Kessel sich auch ziemlich stark verändert, was trotz des aufmerksamsten Schürens nicht verhindert werden kann, oder auch wenn zeitweise von der Maschine mehr Arbeit gefordert wird. Er hat folgende Einrichtung. Von der Hauptachse aus wird durch Zahnrad oder Treibriemen eine vertikale Stange umgedreht; an derselben sind oben zwei nach abwärts hängende Stangen beweglich eingelenkt, die an den unteren Enden zwei schwere, eiserne Kugeln tragen. Je rascher nun die Maschine geht, desto weiter fliegen die Kugeln durch die sogenannte Centrifugalkraft auseinander.

Etwa in der Mitte der Stangen sind nun zwei andere Stangen beweglich eingelenkt, die mit ihren unteren Enden an einer Hülse angreifen, welche die vertikale Stange umgibt; je rascher also die Maschine geht, desto höher steigt die Hülse. Diese hat nun unten zwei hervorragende ringförmige Wülste, und zwischen diese greift das gegabelte Ende eines Winkelhebels, so daß dies Hebelende um so höher gehoben wird, je rascher die Maschine geht. Das andere Ende des Hebels geht also dann um so weiter nach einwärts und dreht dabei eine im Dampfzuleitungsrohre angebrachte Scheibe oder Klappe (die

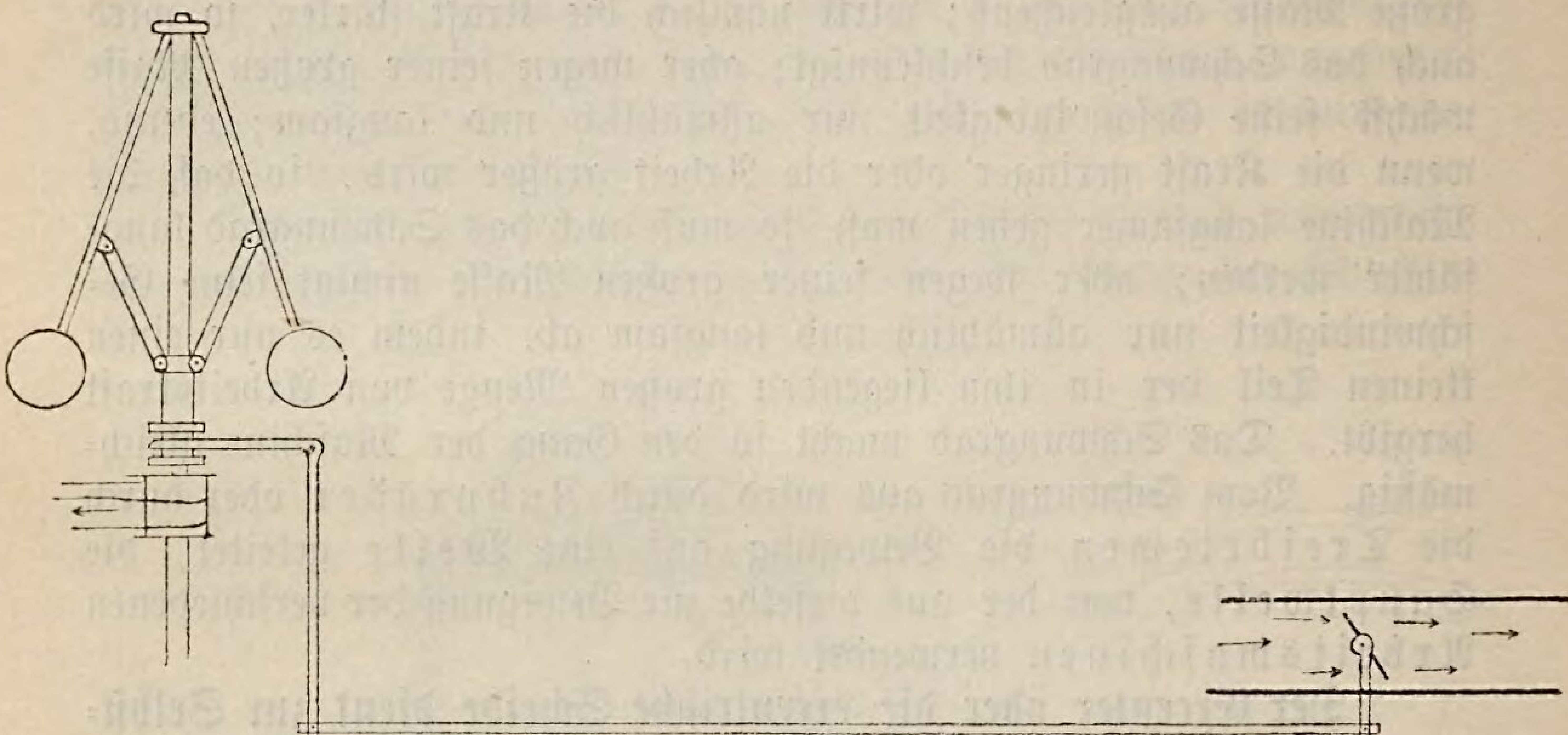


Fig. 96.

Drosselklappe) so, daß sie das Dampfzuleitungsrohr mehr versperrt, so daß nicht mehr so viel Dampf zum Cylinder kommen kann. Wenn demnach der Dampfdruck im Kessel größer wird, und somit die Maschine etwas rascher geht, so wird die Drosselklappe durch den Centrifugalregulator etwas mehr zugedreht, so daß weniger Dampf zum Cylinder kommt, und sich deshalb seine Kraft verringert. Das Umgekehrte findet statt, d. h. die Drosselklappe öffnet sich und läßt mehr Dampf in den Cylinder, wenn die Maschine langsam geht.

71. Der Kondensator.

Der Kondensator ist wohl der wichtigste Maschinenteil, der durch Watt erfunden wurde. Ist nämlich die Maschine eingerichtet, wie bisher beschrieben, so drückt auf die eine Seite des Kolbens der Dampf vom Kessel her, also mit starkem Drucke, während der auf der andern Seite des Kolbens befindliche Dampf mit der freien Luft in Verbindung steht, also ausströmt und nur eine Spannkraft von 1 Atm. (besser ca. $1^1/_4$ Atm. wegen der Reibung) hat. **Um den Druck des Abdampfes vermindert sich der wirksame Druck des Dampfes,** was besonders dann von großem Einfluß ist, wenn die Spannkraft des Kesseldampfes selbst nicht groß ist, 1—3

Atm. Um diesen schädlichen Druck des Abdampfes wegzuschaffen, und damit den Druck des Kesseldampfes besser auszunützen, dazu dient der Kondensator. Er ist ein ziemlich geräumiger Behälter aus Kesselblech; in ihn wird durch eine Röhre A oben der Abdampf eingeleitet; ferner führt in ihn seitlich oben eine Röhre C, die von einem Behälter kalten Wassers, einem Flusse, Bache u. s. w. herkommt und in vielen feinen Öffnungen (Brause) endigt: **durch Einspritzen von kaltem Wasser wird der im Kondensator befindliche Dampf abgekühlt und kondensiert und erhält dadurch eine niedrige Spannkraft; es strömt dann vom Abdampfraume so viel Dampf in den Kondensator, bis der Druck des Abdampfes fast gleich ist dem des Kondensators.** Das Hinunterströmen und Kondensieren des Dampfes geschieht sehr rasch, schon während der Kolben in der Nähe des toten Punktes steht und umkehrt, so daß sogleich beim Wiederbeginne und während seiner Bewegung auf der Abdampfseite nur ein geringer Dampfdruck von 1/4 bis 1/3 Atm. vorhanden ist. Es ist demnach durch den Kondensator dasselbe erreicht, wie wenn der Dampf im Cylinder selbst abgekühlt worden wäre.

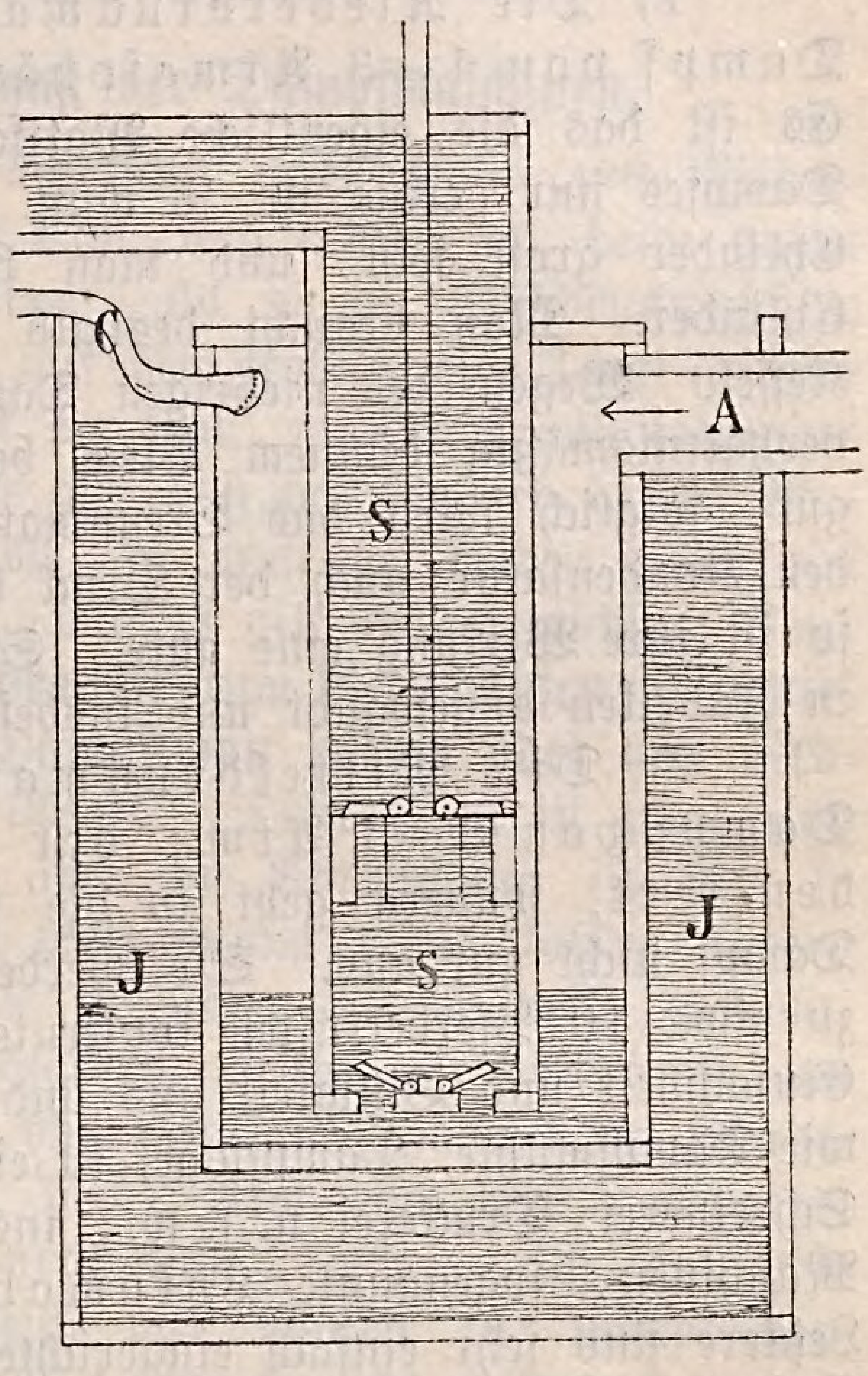


Fig. 97.

Zur Kondensation des Dampfes bedarf es großer Mengen Wasser; diese werden, weil im Kondensator der Druck ein geringer ist, durch den äußeren Luftdruck hineingetrieben. Um die Abkühlung des Dampfes noch zu beschleunigen, steht der Kondensator in einem geräumigen Gefäß (J) (Cisterne), das man stets mit frischem Wasser versieht.

Um das Wasser aus dem Kondensator zu entfernen, braucht man eine Saugpumpe (S), die an den Kondensator angesetzt ist und auch von der Maschine selbst getrieben wird. Sie wird Luftpumpe genannt; denn wenn die Maschine in Betrieb gesetzt wird, so sind Kessel und Kondensator teilweise auch noch mit Luft gefüllt; diese muß zunächst weggeschafft werden, in dem man die Maschine gehen läßt, aber kein Wasser in den Kondensator leitet; die Luftpumpe entfernt dann die Luft aus dem Kondensator.

72. Die Arten der Dampfmaschinen.

Man unterscheidet hauptsächlich drei Arten von Dampfmaschinen:

1) Die Niederdruckmaschine. Sie benützt einen Dampf von 1—3 Atmosphären und hat Kondensator. Es ist das die eigentliche Wattsche Maschine. Da der Druck des Dampfes nur gering ist, so muß, um große Arbeit zu erzielen, der Cylinder groß sein, und man benützt wohl auch zwei oder drei Cylinder. Man braucht deshalb viel Dampf und demnach große Kessel. Wegen des niedrigen Dampfdruckes dürfen die Kessel aus verhältnismäßig dünnem Blech bestehen; dieses leitet die Wärme gut, folglich wird das Brennmaterial gut ausgenützt. Da durch den Kondensator auch der Druck des Abdampfes weggeschafft wird, so ist ihre Wirkung eine gute. Sie werden als stehende Maschinen in Fabriken angewandt und insbesondere auf den Dampfschiffen.

2) Die Mitteldruckmaschine. Sie benützt einen Dampf von 3—5 Atm.; der Abdampf wird nicht kondensiert, sondern geht in die freie Luft; sie nützt demnach den Dampf nicht gut aus. Sie werden nur als kleine Maschinen bis zu etwa 10 Pferdekräften konstruiert, zeichnen sich dann durch ihre Einfachheit und Billigkeit aus und werden benutzt im Kleingewerbe, wie Dampfmühle, Dampfsäge, in einer mechanischen Werkstätte, einer Schreinerei, Druckerei u. s. w.; insbesondere auch als transportable Maschinen, sogenannte Lokomobilen bei den Dampfmaschinen. Letztere sind sehr einfach eingerichtet: der Siederöhrenkessel steht auf Rädern; auf ihm ist der Cylinder mit Kolben, Kolbenstange, Pleuelstange, Hauptachse, Schwungrad und den zwei Excentern angebracht; bei stehenden Maschinen wird auch der eingemauerte Kessel benützt.

Da solche Maschinen meist billig sein sollen und der Kessel keinen großen Raum einnehmen darf, so ist die Feuerungsanlage auch meist recht einfach, und die Hitze des Brennmaterials wird schlecht ausgenützt.

3) Die Hochdruckmaschinen, solche sind alle Eisenbahnlokomotiven, deren Erfinder Stephenson ist. Er erfand den transportabeln Siederöhrenkessel und brachte den Dampf auf hohen Druck. Die beiden Cylinder sind am Kessel selbst angebracht, und die Kolben- resp. Pleuelstange greift an einer mit dem Rade verbundenen Kurbel an. Die Hochdruckmaschine benützt Dampf von 8—10 Atm.; deshalb darf der Cylinder klein sein; man braucht also nur wenig Dampf und also einen kleinen Kessel, der aber sehr stark sein muß. Wegen der Unmöglichkeit bei fahrenden Maschinen das zur Kondensation nötige Wasser mitzuführen, haben solche Maschinen keinen Kondensator. Auch bei stehenden Maschinen wäre der Kondensator nur von geringem Nutzen; denn wenn etwa bei 9 Atmosphären Dampfdruck nur die eine Atmosphäre

Abdampfdruck durch Kondensation weggeschafft werden kann, so ist der Gewinn nur gering und wird fast aufgezehrt durch den Arbeitsverlust, den die Kondensatorpumpe verursacht.

73. Vergleich der Leistung der Dampfmaschinen.

Vergleicht man nun die Wirkung einer Hoch- und Niederdruckmaschine von etwa 8 resp. 2 Atm. und nimmt an, beide haben Kondensator, so möchte es scheinen, als ob die Hochdruckmaschine bedeutend im Vorteil wäre, weil auf dem Kolben eine 4mal größere Kraft drückt. Doch ist das nicht der Fall, wie man aus folgender Überlegung ersieht. Wir nehmen an, daß der Betrieb beider Maschinen gleich viel Geld kosten soll, so muß bei beiden gleich viel Brennmaterial verwendet werden, und es gilt da der wichtige Satz: **eine gewisse Menge Wasser verbraucht zum Verdampfen gleichviel Wärme, gleichgültig, ob es in Dampf von hohem oder von niedrigem Druck verwandelt wird.** (Watt.) Dieser Satz ist zwar nicht ganz genau richtig (Regnault), aber die Abweichung ist nur so gering, daß sie bei der folgenden Betrachtung vernachlässigt werden kann. In der Tabelle Seite 138 ist unter der Rubrik „Gesamt-Kalorien" die Menge Wärme angegeben, welche erforderlich ist, um 1 *kg* Wasser von 0° in Dampf von gewissen Spannungen zu verwandeln, also etwa 643,3 Kal. bei 2 Atm. und 658,5 Kal. bei 8 Atm.; der Unterschied beträgt noch nicht $2^1/_2$ %. Ich kann also bei gleichem Kohlenverbrauch gleich viel Wasser in Dampf verwandeln, erhalte somit für die Niederdruckmaschine Dampf von 2 Atm., für die Hochdruckmaschine Dampf von 8 Atm. Da aber, wie früher gesagt, der Dampf seine hohe Spannkraft insbesondere daher hat, daß er dichter ist, also der Dampf von 8 Atmosphären (nahezu) 4mal dichter ist als der von 2 Atm., so ist das Volumen des Dampfes von 8 Atm. nahezu 4mal (3,55mal) kleiner als das des Dampfes von 2 Atm. Auch das ist aus der Tabelle ersichtlich; denn 1 *kg* Dampf hat bei 8 Atm. 0,252 *cbm*, bei 2 Atm. 0,895 *cbm*, ist also 3,55mal kleiner und dichter, sollte also auch nur 3,55mal größere Spannung haben; was ihm noch fehlt, ersetzt er durch die höhere Temperatur. Soll nun bei beiden Maschinen der Cylinder gleich lang sein und in derselben Zeit gleich oft, also gleich schnell hin und hergehen, so muß der Querschnitt des Hochdruckcylinders (nahezu) 4mal kleiner sein als der des Niederdruckcylinders. Dann ist aber der Druck des Dampfes auf die Kolben in beiden Maschinen wieder gleich groß, z. B. $8 \cdot 100 = 800$ *kg* im Hochdruckcylinder, $2 \cdot 400 = 800$ *kg* im Niederdruckcylinder; die Kraft ist somit dieselbe, und da nun beide Kolben auch in derselben Zeit denselben Weg machen, so ist auch die Arbeit dieselbe. Es sind somit beide Maschinen gleich gut, denn sie liefern für gleiches

Tabelle
über Temperatur, Spannkraft, Dichte und Wärmegehalt des gesättigten Dampfes.

Temperatur C°	Dampfspannung Atmosphäre	Dampfspannung Quecksilberh. m	Volumen von 1 kg Dampf cbm	Gewicht von 1 cbm Dampf kg	Wärme bei Bildung von 1 kg Dampf: Freie W. Kal.	Latente W. Kal.	Gesamt Kal.
0°	0,006	0,0046	205,222	0,0049	0	606,50	606,5
17,86	0,020	0,0152	66,145	0,0151	17,86	594,04	611,9
33,30	0,050	0,0360	27,852	0,0359	33,30	583,40	616,7
46,25	0,100	0,0760	14,516	0,0680	46,25	574,35	620,6
53,35	0,143	0,1086	10,392	0,0962	53,35	569,45	622,8
60,40	0,20	0,1518	7,583	0,1319	60,40	564,50	624,9
65,36	0,25	0,190	6,157	0,1624	65,36	560,94	626,3
81,72	0,50	0,380	3,227	0,3098	81,72	549,58	631,3
92,18	0,75	0,570	2,215	0,4514	92,18	542,42	634,6
100	1	0,760	1,696	0,5913	100	537,00	637,0
106,33	1,25	0,95	1,380	0,7243	106,33	532,57	638,9
111,83	1,50	1,14	1,167	0,8567	111,83	528,77	640,6
116,50	1,75	1,33	1,013	0,9875	116,50	525,50	642,0
120,64	2	1,52	0,895	1,1157	120,64	522,66	643,3
127,83	2,50	1,90	0,729	1,3709	127,83	517,57	645,4
133,91	3	2,28	0,617	1,6204	133,91	513,19	647,3
139,29	3,50	2,66	0,535	1,8658	139,29	509,61	648,9
144,00	4	3,04	0,474	2,1083	144	506,40	650,4
148,44	4,50	3,42	0,426	2,3468	148,44	503,26	651,7
152,26	5	3,80	0,387	2,5842	152,26	500,64	652,9
155,94	5,50	4,18	0,355	2,8122	155,94	498,06	654,0
159,25	6	4,56	0,328	3,0508	159,25	495,75	655,0
165,40	7	5,32	0,285	3,5093	165,40	491,50	656,9
170,84	8	6,08	0,252	3,9706	170,84	487,66	658,5
175,77	9	6,84	0,227	4,4077	175,77	484,23	660,0
180,30	10	7,60	0,206	4,8484	180,30	481,20	661,5
184,60	11	8,36	0,189	5,2832	184,60	478,20	662,8
188,54	12	9,12	0,175	5,7142	188,54	475,46	664,0
200	15,36	11,69	0,139	7,3172	200	467,50	667,5
215	20,26	15,80	0,107	9,3690	215	457,10	672,1

Geld gleiche Arbeit. Da bei den Niederdruckmaschinen die Kessel das Feuer besser ausnützen und Kondensation angewendet wird, so haben sie in Wirklichkeit einen kleinen Vorzug vor den Hochdruckmaschinen.

74. Expansionsmaschine.

Die Hochdruckmaschinen haben aber noch eine bedeutende Verbesserung erfahren durch Anwendung der *Expansion*, d. h. *durch*

Verwendung der bedeutenden Expansivkraft der hochgespannten Dämpfe. Solche Maschinen heißen dann Expansionsmaschinen. Durch eine besondere Art von Steuerung läßt man nämlich nicht den ganzen Cylinder voll Dampf anströmen, sondern sperrt den Dampfzufluß schon ab, wenn ein Teil des Cylinders z. B. ein Viertel voll ist. Dieser nun im Cylinder befindliche Dampf von etwa 8 Atmosphären schiebt den Kolben vermöge seiner Ausdehnungs- oder Expansionskraft bis ans Ende. Dabei verliert er naturgemäß an Spannkraft; denn wenn der Kolben in der Mitte ist, ist die Spannkraft schon auf 4 Atm., und wenn er am Ende ist, bis auf 2 Atm. gesunken. In Fig. 98 bedeutet af die Länge des Cylinders, die vertikalen Linien bedeuten die Dampfspannung; während der Strecke ab strömt der Dampf voll ein, hat also die ganze Spannung; von b bis c sinkt er auf die Hälfte, bis d auf $1/_3$, bis e auf $1/_4$, bis f auf $1/_5$ seiner ersten Spannung. Indem man also den stark gespannten Dampf nicht wie bei der gewöhnlichen Hochdruck- (auch Mitteldruck-)maschine in die Luft läßt, sondern ihn veranlaßt, durch durch seine Expansivkraft noch eine Arbeit zu leisten, erzielt man einen beträchtlichen Gewinn, wie aus folgendem Vergleiche ersichtlich ist.

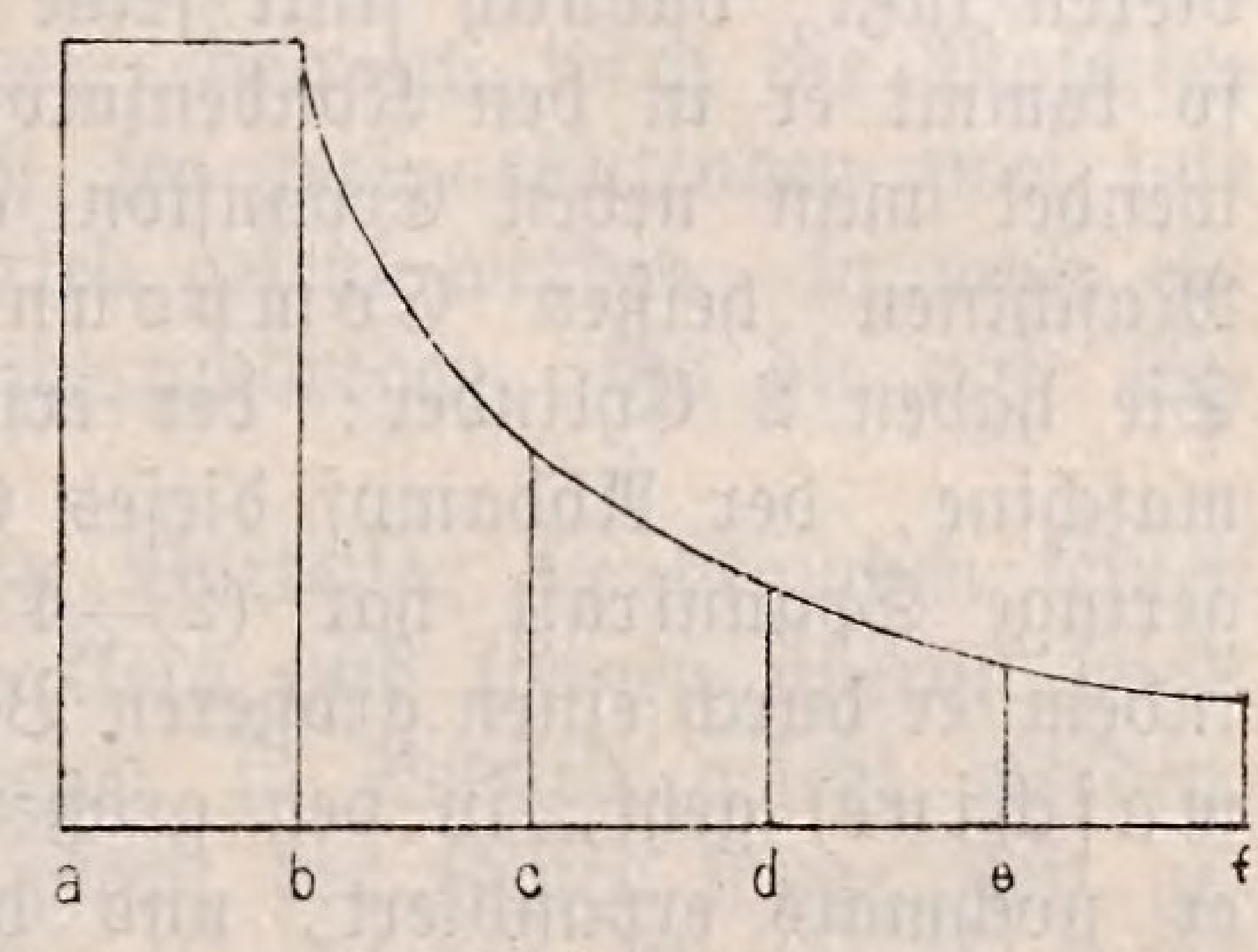


Fig. 98.

Man nehme eine Hochdruckmaschine und eine Expansionsmaschine; beide sollen gleich viel Dampf von je 8 Atmosphären erhalten, die Cylinder sollen gleich lang sein und die Kolben sich gleich schnell bewegen. Wird nun in der Expansionsmaschine der Dampf schon beim ersten Viertel des Weges abgesperrt, so darf der Cylinder einen 4mal größeren Querschnitt haben, um dieselbe Dampfmenge zu verbrauchen, folglich drückt auf seinen Kolben eine 4mal größere Kraft als auf den Kolben der Hochdruckmaschine, er leistet also im ersten Viertel seines Weges schon dieselbe Arbeit wie der Hochdruckkolben auf seinem ganzen Wege. Es sei nämlich dieser Weg $= 60\ cm$, die Hochdruckkolbenfläche $= 300\ qcm$, so ist die Arbeit im Hochdruckcylinder $= 8 \cdot 300 \cdot 0{,}6 = 1440\ kgm$; die Arbeit im ersten Viertel der Expansionsmaschine

$$= 8 \cdot 1200 \cdot \frac{0{,}6}{4} = 1440\ kgm.$$

Die ganze Arbeit, die im Expansionscylinder in den folgenden $3/_4$ seiner Länge geleistet wird, ist also reiner Gewinn, und dieser ist so groß, daß die Leistung der Expansionsmaschine bei demselben Dampf- (Geld-)verbrauch 2-, sogar

3mal größer ist als der der einfachen Hochdruckmaschine. Es werden demnach die meisten, insbesondere die größeren Maschinen als Expansionsmaschinen konstruiert. Auch bei Niederdruckmaschinen wendet man mit großem Vorteil Expansion an, indem man etwa den Dampf von 3 Atm. bloß bis auf $^1/_3$ einströmen und dann expandieren läßt; dadurch sinkt seine Spannkraft auf 1 Atmosphäre und so kommt er in den Kondensator. Bei Hochdruckexpansionsmaschinen wendet man neben Expansion auch noch Kondensation an; solche Maschinen heißen Compoundmaschinen (Verbundmaschinen). Sie haben 2 Cylinder: der erste, kleinere, wirkt als Expansionsmaschine, der Abdampf dieses Cylinders, der also nur mehr eine geringe Spannkraft hat (2—4 Atm.) wird entweder direkt, oder indem er durch einen größeren Behälter (Reciver, daher Recivermaschine) geht, in den größeren Niederdruckcylinder geleitet, wo er nochmals expandiert, und dann als Abdampf kondensiert wird. Solche Maschinen verbinden die Vorteile des hohen Druckes, der Expansion und der Kondensation und sind deshalb die besten. Die ersten derartigen Maschinen mit 2 Cylindern wurden von Woolf konstruiert und daher auch Woolfsche Maschinen genannt. Statt zweier Cylinder verwendet man auch 3, sogar 4, welche der Dampf der Reihe nach durchströmt, und in deren jedem er einen Teil seiner Spannkraft durch Expansion abgibt. Diese Maschinen mit mehrfacher (geteilter) Expansion sind jetzt die besten.

75. Die Gaskraftmaschine.

Anstatt der Mitteldruckmaschinen wendet man, wenn Gas vorhanden ist, auch Gaskraftmaschinen, Gasmotoren, an, die auf folgende Weise wirken: Sie bestehen aus Cylinder, Kolben, Kolbenstange, Pleuelstange, Krummzapfen und Schwungrad, werden aber nicht durch Dampf, sondern durch Gas gespeist, und haben eine etwas komplizierte Steuerung, durch welche folgende Vorgänge ermöglicht werden. Der Kolben geht vorwärts, dabei strömt gewöhnliches Leuchtgas und Luft in den Cylinder; der Kolben geht zurück und preßt dies Gasgemisch in eine am Cylinderende angebrachte Ausbuchtung, Vorkammer. In dem Moment, in welchem nun der Kolben wieder umkehrt, öffnet sich auf kurze Zeit eine kleine Röhre an der Vorkammer, so daß das Gasgemisch sich an einer vor dieser Röhre brennenden Gasflamme entzündet. Das Gasgemisch explodiert, indem das Leuchtgas in der beigemischten Luft rasch verbrennt; durch die dabei entstehende große Wärme bekommen die entstandenen Gase eine große Expansivkraft und treiben den Kolben vorwärts. Der Kolben geht zurück und treibt die Verbrennungsgase aus dem Cylinder. Nun beginnt derselbe Vorgang wieder, indem der Kolben vorwärts geht und der Cylinder sich mit Gas und Luft füllt u. s. w. Unter

4 Kolbengängen ist demnach nur ein wirksamer, nämlich wenn die Kraft des explodierten Gasgemisches den Kolben vorwärts treibt. Die Maschine hat also nicht bloß tote Punkte, sondern immer je 3 tote Gänge zu überwinden; ein verhältnismäßig mächtiges Schwungrad hilft darüber weg; man konstruiert wohl auch die Maschinen derart, daß auch auf der andern Seite des Kolbens Gasgemisch einströmt und Gasexplosion stattfindet; dadurch wird die Maschine doppelwirkend, hat aber doch nach je zwei arbeitenden zwei tote Gänge. Soll die Maschine in Betrieb gesetzt werden, so muß ein Arbeiter das Schwungrad so lange herumdrehen, bis die erste Explosion erfolgt ist.

Diese Gasmotoren haben große Vorteile; sie brauchen keinen Dampfkessel, also keinen Heizer, sind klein und können überall leicht aufgestellt werden; sie können jederzeit in Betrieb gesetzt werden, während bei den Dampfmaschinen zuerst der Kessel lange Zeit geheizt werden muß, und, wenn die Arbeit geschehen ist, der im Kessel vorhandene Wärmevorrat nutzlos verschwindet. Sie sind auch im andauernden Betriebe nicht teurer als die Dampfmaschinen; bei unterbrochenem Betriebe, wie er in kleineren Werkstätten, Druckereien u. s. w. vorkommt, sind sie sogar wesentlich billiger; sie erfordern fast keine Beaufsichtigung und nur wenig Arbeit zur Reinigung und Instandhaltung; die Bedienung derselben ist leicht erlernt. Sie werden jetzt vielfach verwendet, aber nur mit geringer Arbeitskraft, etwa bis 12 Pferdekräfte, und sind für kleinere Betriebe, insbesondere unterbrochenen oder täglich nur kurz dauernden Betrieb, sehr gut verwendbar; jetzt werden auch solche bis zu 100 Pfdkr. gebaut.

Bei der Petroleummaschine wird das Leuchtgas ersetzt durch Petroleum (auch Benzin), welches beim Einspritzen in den heißen Cylinder sofort verdampft.

Die Leistung sämtlicher Maschinen (Dampf-, Wasser-, Gaskraftmaschinen, Windmühlen ꝛc.) wird auf 46 Millionen Pferdekräfte veranschlagt, die der Dampfmaschinen in Deutschland auf $4^1/_2$, Österreich $1^1/_2$, Frankreich 3, England 7, Vereinigte Staaten $7^1/_2$ Millionen Pferdekräfte.

76. Feuchtigkeit der Luft.

Die gewöhnliche Luft enthält stets eine gewisse Menge Wasserdampf. Derselbe gelangt in die Luft durch Verdunsten von Wasser, das mit der Luft in Berührung ist. Man sieht, daß das Wasser einer Pfütze, der feuchten Wäsche, des nassen Erdbodens verschwindet; es verdampft und die Wasserdämpfe mischen sich mit der Luft. Beim Kochen entwickeln sich Dämpfe auch im Innern der Flüssigkeit, und zwar hauptsächlich an der Stelle, welcher die Wärme zugeführt wird, also am Boden; beim Verdunsten bildet sich der Dampf bloß an der Oberfläche des Wassers. Das Verdunsten findet bei jeder Temperatur statt; auch Eis verdunstet, sogar noch bei vielen Graden unter 0.

Die Menge des in der Luft enthaltenen Wasserdampfes mißt man entweder nach der Anzahl von Gramm Wasser, die in 1 *cbm* Luft dampfförmig enthalten sind, oder nach dem Drucke, den der in der Luft vorhandene Wasserdampf ausüben kann, ausgedrückt in *mm* Quecksilberhöhe; z. B. der Dunstdruck beträgt 6,8 *mm* d. h. der Druck des in der Luft enthaltenen Wasserdampfes beträgt 6,8 *mm* Quecksilberhöhe. Man fand nämlich (Dalton), daß der Druck der feuchten Luft gleich ist dem der trockenen plus dem des Wasserdampfes.

Die Luft kann bei einer gewissen Temperatur nur eine gewisse Menge Wasserdampf aufnehmen, bei hoher Temperatur mehr, bei niedriger weniger; es gilt der Satz: Luft kann bei einer jeden Temperatur gerade so viel Wasserdampf aufnehmen, als in demselben Raume, wenn er luftleer wäre, bei dieser Temperatur Wasserdampf sein könnte; so beträgt die Spannkraft des Wasserdampfes bei 20° 17,39 *mm*; also kann Luft von 20° so viel Dampf aufnehmen, daß sein Druck 17,39 *mm* beträgt.

Diese Menge Wasserdampf, welche die Luft bei einer gewissen Temperatur aufnehmen kann, nennt man die Feuchtigkeitskapazität. Sie ist bei niedriger Temperatur gering, bei hoher Temperatur größer (siehe Spannungstabelle des Wasserdampfes). Wenn die Luft so viel Feuchtigkeit enthält, als sie vermöge ihrer Temperatur aufnehmen kann, so nennt man sie absolut feucht oder gesättigt. Meistens hat sie weniger, ist also nicht gesättigt. Die Menge Feuchtigkeit, welche die Luft wirklich hat, nennt man die absolute Feuchtigkeit, und mißt sie auch, wie schon erwähnt, durch ihren Druck in *mm*. Wenn man also sagt, daß die absolute Feuchtigkeit der Luft 11,63 *mm* beträgt, so heißt das, der in der Luft wirklich vorhandene Wasserdampf hat eine Spannkraft von 11,63 *mm* Quecksilberhöhe. Das Verhältnis der absoluten Feuchtigkeit zur Feuchtigkeitskapazität nennt man die relative Feuchtigkeit, und drückt sie aus in Prozenten der Kapazität. Wenn z. B. die Luft 20° hat, also 17,39 *mm* enthalten könnte, aber bloß 11,63 *mm* enthält, so enthält sie $\frac{11{,}63 \cdot 100}{17.39} = 67\,\%$.

Bei einer relativen Feuchtigkeit zwischen 0 und 40 % nennt man die Luft trocken, von 40—70 % normal, von 70—100 % feucht.

77. Hygrometer und Psychrometer.

Apparate, durch welche man den Feuchtigkeitsgehalt der Luft messen kann, nennt man Hygrometer, deren es mehrere Arten gibt.

Das Hygrometer von August wird Psychrometer (Naßkältemesser) genannt. Es besteht aus zwei Thermometern, die an

einem Gestelle neben einander angebracht sind; das eine mißt die Temperatur der Luft und heißt das trockene Thermometer; die Kugel des anderen, des feuchten, ist mit dünnem Zeuge umwickelt, das mit Wasser befeuchtet wird, am besten dadurch, daß man es an einen dicken Baumwollfaden anbindet und diesen in ein untergestelltes Schälchen destillierten Wassers hängen läßt, wodurch sich das Zeug stets feucht hält. Man findet, daß das feuchte Thermometer meist tiefer steht als das trockene; denn das Wasser an der Kugel des feuchten Thermometers verdunstet, verbraucht dabei Wärme (latente Wärme des Wasserdampfes), und wird deshalb kälter, so daß das feuchte Thermometer tiefer steht als das trockene; dieser Unterschied beträgt um so mehr, je relativ trockener die Luft ist, weil in trockener Luft das Wasser rascher verdampft als in feuchter. Aus Tabellen kann man dann die zu den Angaben des trockenen und feuchten Thermometers gehörige absolute und relative Feuchtigkeit ablesen. Die Angaben dieses Psychrometers sind sehr zuverlässig.

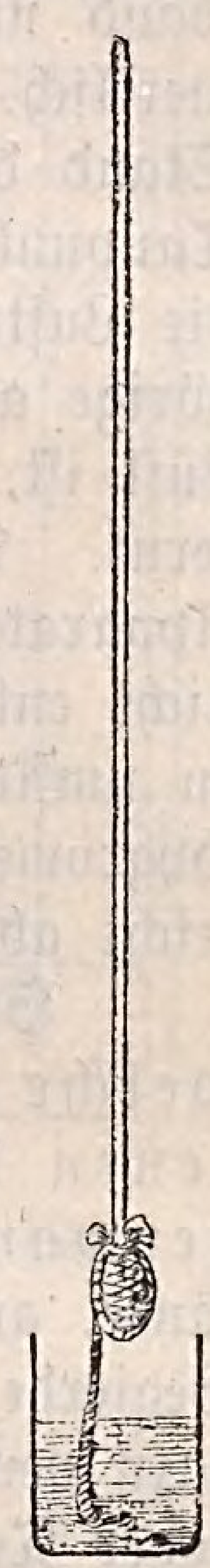


Fig. 99.

Das Daniell'sche Hygrometer. Es dient zur Bestimmung des Taupunktes, d. h. derjenigen Temperatur, bei der die Luft mit der eben in ihr enthaltenen Feuchtigkeit gesättigt ist. Die Kugel eines Thermometers befindet sich in einem kleinen Gefäße aus poliertem Silber- oder Nickelblech. Das Gefäß setzt sich oben in eine Glasröhre fort, die seitwärts führt und in einer Glaskugel endigt. Im Gefäße befindet sich etwas Äther; Röhre und Kugel sind durch Auskochen luftleer gemacht und dann zugeschmolzen, also bloß mit Ätherdämpfen gefüllt, und die Kugel mit Zeug umwickelt. Tröpfelt man auf dieses Zeug etwas Äther, so geschieht ähnliches wie beim Ätherdampfbarometer. Der Äther verdampft rasch, verbraucht Wärme, kühlt also auch den Ätherdampf in der Kugel ab; dieser kondensiert sich und bekommt eine geringere Spannkraft; deshalb strömt aus dem Silbergefäß Ätherdampf in die Kugel; dadurch verringert sich der Ätherdampfdruck im Gefäße, und der Äther kocht deshalb; dabei verbraucht er aber selbst Wärme, wird immer kälter und kühlt so die Silberwand ab. Die Luft in der Nähe der Silberwand wird deshalb auch kalt, und bald so kalt, daß sie mit der in ihr enthaltenen Feuchtigkeit gesättigt ist

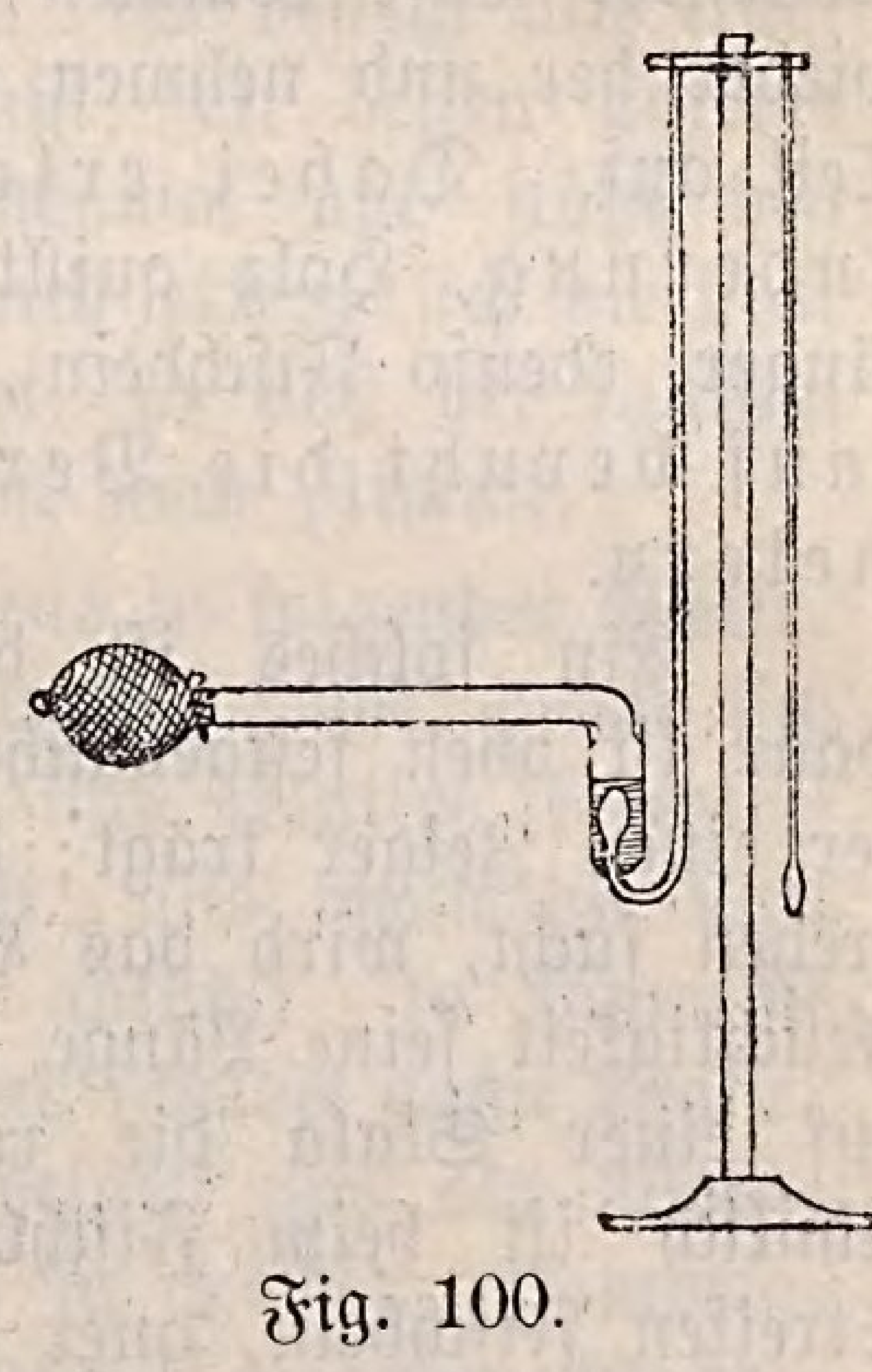


Fig. 100.

bei der geringsten weiteren Abkühlung scheidet sie Wasserdampf aus; dieser schlägt sich in Form von feinen Tautröpfchen an die Silberwand nieder, trübt dadurch deren Glanz und macht sich so bemerklich. Sobald man diese Trübung wahrnimmt, liest man den Stand des im Gefäße steckenden Thermometers ab und findet so den Taupunkt. An einem daneben befindlichen Thermometer liest man die Lufttemperatur ab. Aus Tabellen findet man dann die zugehörige absolute und relative Feuchtigkeit. Je (relativ) trockener die Luft ist, desto weiter ist der Taupunkt von der Lufttemperatur entfernt. Die Angaben dieses Apparats sind sehr zuverlässig. Beide Apparate können bei genauen und richtigen Feuchtigkeitsbestimmungen nicht entbehrt werden, da sie aber für den gewöhnlichen Gebrauch zu umständlich sind, so bemühte man sich schon lange, auch einfache Hygrometer herzustellen, an denen wenigstens die relative Feuchtigkeit leicht abgelesen werden kann.

Hygroskopische Substanzen nennt man solche, welche die Eigenschaft haben, den in der Luft enthaltenen Wasserdampf aufzunehmen und in Wasser zu verwandeln. Es gibt manche Stoffe, wie konzentrierte Schwefelsäure, ausgeglühte Potasche, Chlorcalcium u. s. w., welche mit großer Begierde den Wasserdampf der Luft aufnehmen, so daß man sie dazu verwenden kann, die Luft zu trocknen; sie geben erst bei hoher Temperatur das aufgenommene Wasser wieder her. Manche Körper, die aus getrocknetem tierischen oder pflanzlichen Zellgewebe bestehen, wie Holz, Stroh, Haar, Fischbein, Darmsaiten, Wolle u. s. w. haben auch die Fähigkeit, Wasserdampf aus der Luft aufzunehmen; sie nehmen jedoch nur eine Menge auf, die der relativen Feuchtigkeit der sie umgebenden Luft proportional ist, geben auch bei gewöhnlicher Temperatur, wenn sie in trockenere Luft kommen, einen entsprechenden Teil ihres Wassers wieder her und nehmen in feuchter Luft wieder einen entsprechenden Teil auf. Dabei erleiden diese Körper eine Formveränderung, Holz quillt auf und wird größer, das Haar wird länger, ebenso Fischbein, und die Darmsaite dreht sich auf. Darauf beruht die Verwendung dieser Körper zu Hygrometern.

Ein solches ist das Haarhygrometer. Ein entfettetes Haar ist oben festgemacht, unten um einen drehbaren Stift gewickelt, der einen Zeiger trägt; durch ein kleines Gewicht, das den Stift zu drehen sucht, wird das Haar gespannt erhalten. Es ändert mit der Feuchtigkeit seine Länge, dreht den Stift und den Zeiger, der dann auf einer Skala die relative Feuchtigkeit in Prozenten angibt. Ähnlich ist beim Fischbeinhygrometer an Stelle des Haares ein Streifen Fischbein, quer zur Faser geschnitten, angebracht.

Das Wolpert'sche Strohhalmhygrometer besteht aus

einem schmalen Streifen eines Strohhalms, der am einen Ende festgeklemmt ist und mit dem andern Ende vor einer Skala spielt; der Strohhalm ist in ganz feuchter Luft gerade, krümmt sich in trockener Luft so, daß die glänzende Seite desselben außen ist. Seine Angaben sind sehr zuverlässig, und es ist wegen seiner Einfachheit für den gewöhnlichen Gebrauch sehr gut verwendbar.

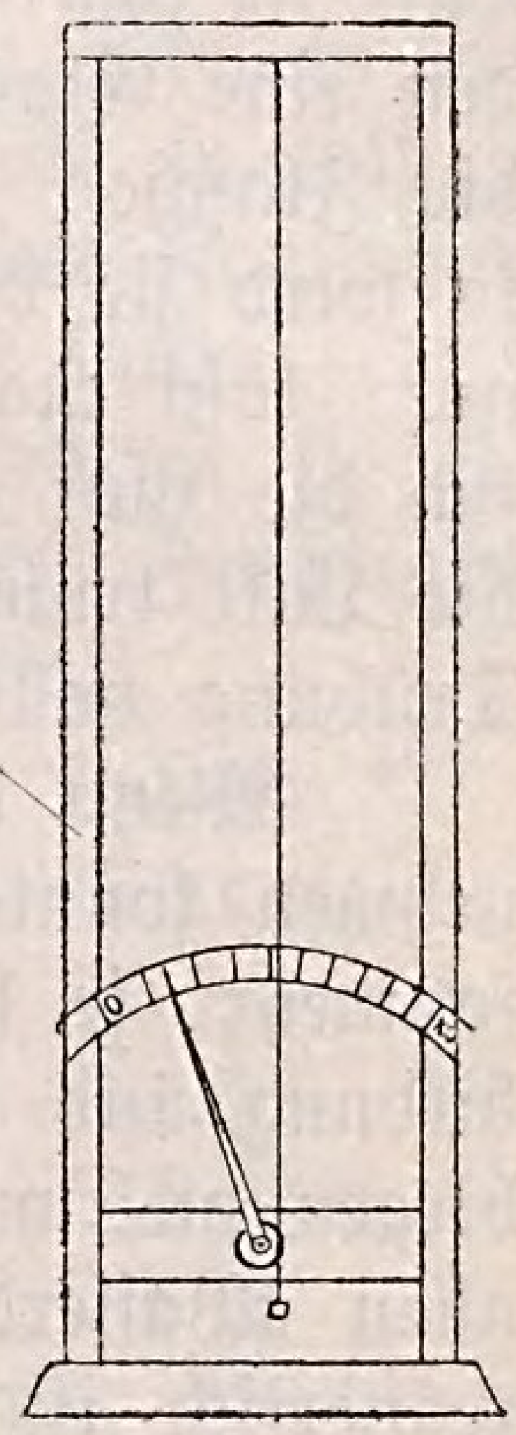


Fig. 101.

Solche Hygrometer benützt man in Fabriken, Krankenzimmern, Schul- und Wohnräumen, um die Feuchtigkeit der Luft zu messen; Luft zwischen 40 und 70 % ist nämlich für den Menschen am zuträglichsten, feuchtere Luft erscheint schwül und dumpf, trockene greift die Lunge zu stark an. Da die kalte Luft an sich nur wenig Feuchtigkeit aufnehmen kann, bei 0° 4,6 *mm*, so wird sie, wenn sie im Winter in das Zimmer kommt und dort erwärmt wird, relativ sehr trocken, weshalb man oft durch aufgestellte Verdampfschalen der Zimmerluft Feuchtigkeit zuführen muß.

78. Meteorologische Erscheinungen der Luftfeuchtigkeit.

Aus dem Feuchtigkeitsgehalt der Luft erklären sich viele Erscheinungen in der Witterung. Zunächst die Wolkenbildung. Zu ihrer Erklärung bedarf man folgenden Gesetzes: Wenn man Luft zusammendrückt, so wird sie dadurch allein schon wärmer, und umgekehrt, wenn man sie ausdehnt, so wird sie dadurch allein schon kälter, und zwar ist der Betrag dieser Temperaturänderung ein sehr beträchtlicher. Das pneumatische Feuerzeug. Es besteht aus einer Metallbüchse, in die ein Stempel luftdicht paßt; an dessen unterer Fläche befestigt man ein Stückchen Feuerschwamm und stößt den Stempel rasch und stark in die Büchse; dadurch erhitzt sich die Luft so stark, daß sie den Feuerschwamm entzündet, so daß bei raschem Herausziehen des Stempels der Feuerschwamm noch glimmt.

Die Wolkenbildung geschieht meistens in folgender Weise: feuchte Luft steigt aus irgend einer Ursache in die Höhe, dehnt sich aus, und wird dadurch kälter: deshalb wird ihre relative Feuchtigkeit größer, sie kommt bald an den Taupunkt, und wenn die Luft sich noch weiter ausdehnt, also noch weiter abkühlt, so kann sie nicht mehr alle Feuchtigkeit bei sich behalten und scheidet dann Wasser in Form von kleinen Tröpfchen aus; diese erscheinen uns als Wolke. Wenn solche Luft wieder tiefer sinkt, so wird sie wieder zusammengedrückt, wird dadurch wärmer, kann also die ausgeschiedenen Wasserteilchen wieder verdampfen und als Dampf aufnehmen.

An einem lehrreichen Versuche kann man dies sehen. Man nimmt einen Glasballon, schwenkt ihn mit Wasser aus, so daß die Luft in ihm feucht ist, und verschließt ihn mit einem Kork, durch den eine Glasröhre gesteckt ist (bringt auch etwas Zigarrenrauch in die Flasche). Bläst man nun durch die Röhre Luft in den Ballon, so wird sie verdichtet, wärmer, und nimmt noch mehr Feuchtigkeit auf: läßt man die eingeblasene Luft wieder ausströmen, so dehnt sich die Luft im Ballon aus, und es scheidet sich Nebel aus, der die Luft trübt; wenn man wieder Luft einbläst, verschwindet die Trübung vollständig u. s. f.

Wenn die Luft vom Meere her, wo sie viel Feuchtigkeit aufnehmen konnte, gegen das Land weht, so muß sie sich erheben, um so mehr, je höher das Land ist; daher tritt Abkühlung, Wolkenbildung und infolge dessen Regen ein; deshalb regnet es in Gebirgen viel mehr als im Flachlande. Die Alpen kondensieren fast allen Wasserdampf der über sie hinstreichenden Luft; besonders regnerisch ist deshalb auch die steil ansteigende Küste Norwegens, das isoliert stehende Harzgebirge, ebenso Rhön, Eifel, Fichtelgebirge, Spessart. Überhaupt sind die Regenmengen in allen deutschen Mittelgebirgen viel größer als in den Thälern; denn wenn die Luft wieder ins Thal herabsteigt, wird sie zusammengedrückt und deshalb wärmer; sie löst dann einen Teil der Wolken, oft die ganzen Wolken auf, so daß im Thale weniger Regen, mehr Sonnenschein und schon wegen der Zusammendrückung der Luft mehr Wärme ist. Deshalb gedeiht in diesen Thälern Wein, während auf den Höhen oft nur Hafer und Kartoffeln fortkommen, und auch diese häufig durch Regen verdorben werden.

Daß es auf hohen Bergen kälter ist, als im Thale, erklärt sich einerseits daraus, daß die Wärme des Bodens leichter in den Himmelsraum ausstrahlen kann, da die darüber liegende Luftschichte dünner ist, insbesondere aber auch daraus, daß, wenn Luft vom benachbarten warmen Tiefland über das Gebirge weht, sie sich durch die Ausdehnung abkühlt, um so mehr, je höher sie steigt, also kalt auf der Höhe des Berges ankommt. Beim Herabsteigen wird sie durch das Zusammenpressen wieder wärmer. Trockene Luft nimmt bei je 100 *m* Höhe um 1° C ab, feuchte langsamer, z. B. im Winter, wo sie oft relativ sehr feucht ist, erst bei 270 *m* um 1°. Wenn demnach Luft von Italien her 20° warm ist und über die Alpen etwa nach der Schweiz geht, so hat sie auf der Kammhöhe etwa nur 0°, auf den Bergspitzen aber tief unter 0°. Steigt sie in die Schweiz herunter, so hat sie etwa 15°, weil ja die Schweiz höher liegt als Italien.

Dies würde der Fall sein, wenn die Luft trocken ist; ist sie aber wie gewöhnlich feucht, so scheidet sie auf den Bergen Wasser aus, das massenhaft in Form von Regen oder Schnee auf die Berge

fällt. Luft von 20° und 86 % scheidet bei 3700 *m* 6,6 Gramm Wasserdampf aus jedem *cbm* als flüssiges Wasser aus. Durch die Kondensation des Wasserdampfes wird aber Wärme frei, die latente Wärme des Wasserdampfes; diese kommt der Luft zu gute, so daß sie sich etwas erwärmt, also schon auf den Bergen nicht so kalt ist, als sie infolge der Höhe hätte sein sollen, also auf der Kammhöhe etwa 6° anstatt 0°, auf den Bergspitzen etwa —5° statt —12°. Steigt die Luft nun in die Thäler herab, so erwärmt sie sich anstatt bloß auf 15° auf 30°, und da sie zudem ihre Feuchtigkeit größtenteils verloren hat, so erscheint sie trocken (30 %).

Man übersieht diese Verhältnisse aus folgender Tabelle:*)

Italien,	Kammhöhe (2500 *m*),	Schweiz.
Luftdruck 760 *mm*	564,3 *mm*	755,2 *mm*
Temperatur 20°	5,9°	30,5°
Dunstdruck 15,0 *mm*	7,0 *mm*	9,4 *mm*
Relative Feucht. 86 %	100 %	29 %

Ähnliche Verhältnisse trifft man in den Ländern, welche im Bereiche eines herrschenden Windes, etwa des Passatwindes liegen; trifft dieser auf eine Gebirgskette, so verliert er beim Überschreiten derselben seine Feuchtigkeit und erscheint auf der Westseite des Gebirges als sehr trockene Luft. Deshalb findet man z. B. an der Westküste von Südamerika, Südafrika, sowie in dem großen Gebiete von Australien, das westlich von seinem an der Ostküste gelegenen Küstengebirge liegt, regenarme, trockene Gegenden: die Guanoinseln, Lüderitzland und die australische Wüste.

Die großen Haufenwolken (cumulus), die sich besonders hoch bei Gewittern bilden, entstehen auf folgende Weise. Wenn durch irgend welche Ursache ein Landstrich stärker erwärmt ist als die umliegenden Landstriche, so steigt die auf ihm liegende Luftmasse in die Höhe, indem von allen Seiten die etwas kältere Luft hinzuströmt. Dies Aufsteigen würde sehr bald ein Ende nehmen, (bei 3—400 *m*), weil durch die dadurch bedingte Ausdehnung die Luft sich abkühlt. Wenn aber die aufwärts treibende Kraft nur so weit reicht, daß die Temperatur der Luft den Taupunkt erreicht, so tritt etwas Neues hinzu, was das weitere Aufsteigen befördert. Ist nämlich die Luft etwas über diese Höhe gedrückt worden, so ist sie mit der in ihr enthaltenen Feuchtigkeit gesättigt, und scheidet sogar etwas Wasser in Form von Nebel aus; dadurch wird aber die latente Wärme des Wasserdampfes frei und kommt der Luft zu gute; sie ist deshalb bei dieser Höhe nicht so kalt, als sie infolge der Höhe sein sollte und als die umliegende, gleich hoch liegende Luft ist, sondern etwas wärmer, also auch etwas leichter; sie fährt deshalb fort, in die Höhe zu steigen; dabei kühlt sie sich aber immer mehr

*) Aus „Mohn, Grundzüge der Meteorologie.“

ab und scheidet immer mehr Wasserdampf aus; dessen latente Wärme kommt wieder der Luft zu gute, so daß sie wieder wärmer ist, als sie infolge der Höhe sein sollte; so geht es fort, die Luft steigt immer höher und scheidet immer mehr Wasserdampf aus. Wenn sie aber schon sehr hoch gestiegen ist, und viel, fast allen Wasserdampf ausgeschieden hat, so kann sie beim weiteren Steigen nur mehr wenig Wasserdampf ausscheiden; die frei werdende latente Wärme genügt nicht mehr, um den durch das Aufsteigen verursachten starken Kälteverlust zu ersetzen. die Luft wird deshalb so kalt, als sie infolge der Höhe sein muß, ist noch dazu beschwert mit dem Gewichte der ausgeschiedenen Wassertropfen und hört deshalb in einer gewissen Höhe auf, noch weiter zu steigen.

Eine solche Wolke bietet von der Ferne gesehen folgenden Anblick: unten ist sie scharf abgeschnitten in einer Höhe, in welcher der Taupunkt liegt (Nebelgrenze, bei Gewittern in 1400 *m* Höhe). Diese Höhe liegt um so tiefer, je (relativ) feuchter die Luft ist. Nach oben zeigt sich die Wolke geballt, aufgetrieben, mit abgerundeten, scharf gezeichneten Rändern. Man sieht daran, daß die Wolke nicht etwa durch Vermischen zweier Luftmassen entstanden ist, sondern durch Aufsteigen der unteren Luft unter gleichzeitiger Ausscheidung von Wasser (Gipfel der Gewitterwolken in 3600 *m* Höhe).

Je feuchter die aufsteigende Luft ist, zu um so größerer Höhe kann sie steigen; deshalb sehen wir besonders an heißen und schwülen Tagen sehr hohe derartige Wolken entstehen. Diese Wolken bilden sich oft sehr rasch, in einer oder einigen Stunden, und da die Luft dabei zu sehr bedeutender Höhe aufsteigt, demnach fast alle Feuchtigkeit ausscheidet, so ist in einer solchen Wolke eine ungemein große Menge Wasser enthalten, das dann in Form von oft sehr starken Regengüssen herabfällt.

Auch bei den barometrischen Depressionen liegt die den Wind hervorbringende und die Depression erhaltende Kraft in der frei werdenden latenten Wärme; denn die gegen die Mitte der Depression strömende Luft steigt zugleich in die Höhe, scheidet ihren Wasserdampf aus, wird dadurch wärmer, als sie infolge der Höhe sein sollte, und fließt oben nach allen Richtungen ab. Es ist also um die Mitte des Minimums eine Säule aufsteigender Luft, die wärmer ist als die umliegende Luft und infolgedessen in die Höhe steigt, getrieben durch die untere nachdrängende Luft. So lange die unten nachkommende Luft selbst feucht ist, bleibt die auftreibende Kraft und damit die Depression erhalten, sobald sie aber weniger feucht ist, verliert sie an frei werdender Wärme, die Depression kann sich nicht mehr erhalten und füllt sich aus; das ist meist der Fall, wenn die Depression in das Innere eines Kontinentes eindringt.

Nebel entsteht, wenn feuchte Luft sich unter den Taupunkt abkühlt und infolge dessen Wasser ausscheidet. Es entsteht häufig auf

dem Meere, wenn die Luft sich am Tage erwärmt und mit Feuchtigkeit gesättigt hat und sich nachts abkühlt, ebenso zu Lande, insbesondere in wasserreichen Thälern im Frühjahre und Herbste, wenn auf einen warmen, windstillen Tag eine helle Nacht kommt, in der sich die Luft rasch abkühlt. Ebenso entstehen starke Nebel, wenn warme Luft, die sich auf dem Meere mit Feuchtigkeit gesättigt hat, über einen kalten Meeresteil, eine Meeresströmung mit kaltem Wasser, oder über ein kälteres Land streicht, daher kommen die häufigen Nebel auf Newfoundland, wenn die Luft vom warmen Golfstrom über die kalte Meeresströmung bei Newfoundland kommt, und die häufigen, dichten Nebel von London, die besonders deshalb so dicht sind, weil die Rauchteilchen die Nebelbildung begünstigen, da sich an diesen Rauchteilchen das Wasser leichter ausscheidet, demnach die Nebeltröpfchen kleiner und zahlreicher sind.

79. Kondensation der Gase.

Wenn ein Dampf eine Dichte und Spannkraft hat, die seiner Temperatur entspricht, so nennt man ihn gesättigt, er kann bei dieser Temperatur nicht mehr Wasser (oder überhaupt Flüssigkeit) aufnehmen; wenn man seine Temperatur erhöht, kann er wieder Wasser aufnehmen; wenn man ihn abkühlt, muß er Wasser ausscheiden. Überhitzter Dampf ist solcher Dampf, dessen Dichte und Spannkraft kleiner ist, als sie vermöge der Temperatur sein sollten; man erhält ihn am einfachsten, wenn man im verschlossenen Gefäße gesättigten Wasserdampf etwa von 100° aber sonst kein Wasser mehr hat, und ihn noch weiter erwärmt, etwa auf 200°; dabei steigt seine Dichte gar nicht, seine Spannkraft nur wenig wegen der Erwärmung, wie ja auch Luft eine größere Spannkraft durch Erwärmung erhält; sie steigt etwa auf $1^1/_3$ Atm., während sie bei 200° 15 Atm. betragen sollte. Der Dampf ist überhitzt. Durch Abkühlung wird er wieder gesättigt.

Die gewöhnlichen Gase sind auch anzusehen als überhitzte Dämpfe; denn wenn man etwa Kohlensäure sehr tief abkühlt, so wird sie flüssig, noch besser, wenn man sie zusammenpreßt und zugleich abkühlt, also einerseits die Dichte größer, andererseits die Temperatur niedriger macht, so wird sie flüssig. Wenn man so durch eine Kompressionspumpe immer mehr Kohlensäure in ein starkes eisernes Gefäß preßt, das durch herumgelegtes Eis auf 0° erhalten wird, so wächst zunächst nach dem Mariotte'schen Gesetz die Spannkraft der Kohlensäure bis 40 Atmosphären, dann aber steigt die Spannkraft nicht mehr; der Raum kann bei 0° nicht mehr Kohlensäure luftförmig enthalten, sondern wenn man noch mehr Kohlensäure hineinpumpt, so verwandelt sich stets ebensoviel Kohlensäure in eine Flüssigkeit. Dabei schmilzt viel Eis ab infolge der Wärme, die durch die Kompression auf ein 40mal kleineres Volu=

men erscheint, auch infolge der latenten Wärme, die beim Flüssigwerden frei wird. Kohlensäure von 0° und 1 Atm. ist also nicht gesättigt: sie ist anzusehen als der überhitzte Dampf einer Flüssigkeit. Ebenso lassen sich viele Gase flüssig machen, z. B. schwefelige Säure, Ammoniak, Schwefelwasserstoff, Kohlensäure, Stickoxyd u. s. w. Solche Gase nennt man koerzible Gase. Manche Gase ließen sich aber trotz beträchtlicher Kompression und starker Abkühlung nicht flüssig machen; man nannte sie deshalb inkoerzibel oder permanent; solche sind: Sauerstoff, Stickstoff, Wasserstoff, Leuchtgas. In neuester Zeit hat man auch sie flüssig gemacht.

Wenn man flüssige Kohlensäure bei einer feinen Öffnung ausströmen läßt, so verwandelt sie sich, da sie nach dem Ausströmen nur mehr unter dem Drucke von einer Atm. steht, sofort wieder in luftförmige; aber bei diesem Verdampfen verbraucht sie so viel Wärme, daß die noch weiter herausspritzende in dem erzeugten kalten Raume sogar gefriert und wie Schnee zu Boden fällt. In einem Gefäße gesammelt zeigt diese gefrorene Kohlensäure eine Kälte von etwa —79° und mit Äther gemischt von —100° (ca.) Hineingegossenes Quecksilber gefriert und wird fest wie Silber.

80. Mechanische Gastheorie.

Man hat, um sich die verschiedenen Eigenschaften der luftförmigen Körper zu erklären, folgende Annahme (Hypothese) über den luftförmigen Aggregatszustand gemacht. Die Moleküle der festen und flüssigen Körper liegen verhältnismäßig ruhig neben einander; zwar machen sie schwingende, hin- und hergehende Bewegungen um den Punkt, an dem sie sich in Ruhe befinden sollen; aber sie machen keine fortschreitende Bewegung. Die Moleküle der gasförmigen Körper besitzen eine fortschreitende Bewegung von großer Geschwindigkeit. Da aber gewöhnlich, z. B. in der gewöhnlichen Luft, die Moleküle sehr dicht beisammen liegen (ca. 1 Trillion in einem *cmm*, 1000000 neben einander auf der Länge eines *mm*), so kann keines seinen Weg unbehindert, geradlinig fortsetzen, sondern sehr oft treffen sie auf einander und prallen dann von einander zurück wie zwei elastische Kugeln (Billardbälle), ohne etwas von ihrer Geschwindigkeit zu verlieren. Sehr bald treffen sie wieder mit anderen Molekülen zusammen, werden wieder zurückgestoßen u. s. w. kurz: infolge der sehr häufigen Zusammenstöße mit anderen Molekülen wird ein jedes Molekül nach allen möglichen Richtungen hin- und hergeworfen, legt in gerader Richtung stets nur einen sehr kurzen Weg zurück und behält dabei seine anfängliche Geschwindigkeit. Trifft ein Molekül auf einen festen oder flüssigen Körper, so wird es auch von diesem zurückgeworfen wie ein Ball von der Wand. Auf dieser Annahme über die Natur der gasförmigen Körper beruht folgende Theorie (Anschauungsweise) der Gase, welche man eine mechanische

nennt, weil sich alle Erscheinungen bei Gasen erklären lassen bloß mittels mechanischer Eigenschaften (Bewegung, Elastizität ꝛc.) der Moleküle.

1) Die Gase haben das Bestreben, sich auszudehnen. Wenn ein Gas in einem Gefäße eingeschlossen ist, und man verbindet dieses Gefäß mit einem zweiten, luftleeren Gefäße, so finden die Gasmoleküle nichts, das sie in ihrem Wege aufhält; sie setzen deshalb ihre Bewegung ungehindert fort, kommen so in das zweite Gefäß und füllen dasselbe an.

2) Die Gase üben einen Druck auf die Gefäßwände, der ihrer Dichtigkeit proportional ist.

Wie die Gasmoleküle, wenn sie ihre Bewegung machen, sich selbst gegenseitig oft treffen und abstoßen, so treffen sie auch häufig auf die Wand und werden von derselben zurückgestoßen. Jedes einzelne Molekül, das gegen die Wand stößt, übt aber dabei einen kleinen Druck aus, und da beständig eine sehr große Anzahl von Molekülen in rascher Aufeinanderfolge auf die Gefäßwand trifft, so bewirken diese ungemein vielen Schläge einen gleichbleibenden, kontinuierlichen Druck auf die Gefäßwand.

Macht man die Dichte des Gases größer, etwa 2 mal größer, so treffen jetzt in derselben Zeit 2 mal mehr Moleküle die Gefäßwand; also ist auch ihr Druck auf die Gefäßwand 2 mal größer; man erkennt so, daß der Druck des Gases seiner Dichte proportinal ist.

3) Ein Gas verbreitet sich gleichmäßig über den Raum, in dem es enthalten ist, so daß es an jeder Stelle des Raumes dieselbe Spannkraft und Dichte besitzt.

Es sei das Gas ungleichmäßig verteilt, so daß von einer gewissen Stelle aus nach links die Moleküle dichter sind als nach rechts, so wird diese Stelle von links von mehr Molekülen getroffen als von rechts, also von links mehr gedrückt, als von rechts; infolgedessen bewegen sich die an dieser Stelle befindlichen Moleküle von links nach rechts. Gleichgewicht zwischen den Teilen des Gases kann nur vorhanden sein, wenn jedes Molekül von allen Seiten her von gleich vielen Molekülen getroffen wird, wenn also die Dichte des Gases im ganzen Raume dieselbe ist; dann ist auch die Spannkraft im ganzen Raume dieselbe.

4) Zwei Gase mischen sich nur langsam miteinander. Weil ja die Anzahl der Moleküle auch in einem kleinen Raume ungemein groß ist, also die Moleküle sich ungemein oft treffen und so von ihrer geradlinigen Bahn abgelenkt werden, so kommen sie trotz ihrer verhältnismäßig großen Geschwindigkeit nicht rasch vorwärts. Man darf sich nicht etwa vorstellen, daß ein Gasmolekül, das sich in einem *cbm* befindet, ungehindert zwischen den

Wänden des *cbm* hin und her fliegt so oft, als es seine Geschwindigkeit ermöglicht; sondern man muß sich vorstellen, daß es schon einem Moleküle, das sich im Innern eines *cmm* befindet, infolge der häufigen Zusammenstöße mit andern Molekülen ungemein schwer fällt, eine Wand des *cmm* zu erreichen, daß es hiezu eine verhältnismäßig lange Zeit braucht. Sind deshalb in einem Gefäße zweierlei Arten von Gas getrennt, das eine (schwerere) unten, das andere (leichtere) oben, so wird es dem Molekül des unteren Gases nicht leicht, in den oberen Raum zu gelangen, weil es hiebei beständig von den Molekülen des oberen Gases gestoßen und so von seiner geradlinien Bahn abgelenkt wird, und umgekehrt. Gleichwohl mischen sich die Gase bei genügend langer Zeit sogar entgegen dem Gesetze der Schwere, indem die Moleküle des einen Gases zwischen die des anderen eindringen.

Betrachten wir zwei Gase von verschiedenem spezifischen Gewicht, so müssen wir uns fragen, wie es komme, daß sie doch denselben Druck hervorbringen können; betrachten wir also etwa Sauerstoff und Wasserstoff, deren sp. G. sich wie 16 : 1 verhalten, und denken uns, daß sich beide in demselben Gefäße befinden, etwa Sauerstoff unten und Wasserstoff oben, und an einander grenzen, so üben beide denselben Druck aus auf die Grenzfläche. Man hat nun Gründe, anzunehmen, daß in jedem Liter bei demselben Drucke und derselben Temperatur (etwa 0°) gleich viel Gasmoleküle enthalten sind, gleichgültig, welcher Art die Gase sind; also in einem Liter Sauerstoffgas befinden sich ebensoviel Sauerstoffmoleküle, als in einem Liter Wasserstoffmoleküle sich befinden. (Satz des Avogadro). Da nun das Liter Sauerstoff 16 mal mehr wiegt, als das Liter Wasserstoff, so folgt, daß jedes Molekül Sauerstoff 16 mal mehr wiegt, als ein Molekül Wasserstoff. Hätten nun beide Gasmoleküle dieselbe Geschwindigkeit, so würden beide verhältnismäßig gleich oft auf eine Stelle der Grenzfläche anprallen; der Druck, den sie dadurch hervorbringen, müßte demnach ein verschiedener sein, der Druck des Sauerstoffes wäre 16 mal größer als der des Wasserstoffes. Da man aber sieht, daß beide denselben Druck ausüben, so nimmt man an, daß die Wasserstoffmoleküle eine größere Geschwindigkeit besitzen, und deshalb 1) öfter gegen die Fläche treffen, 2) wegen der größeren Geschwindigkeit auch mit größerer Wucht gegen die Fläche treffen; so ersetzen die Wasserstoffmoleküle das, was ihnen an Masse abgeht, durch größere Geschwindigkeit, öfteres und stärkeres Anschlagen, und bringen dadurch denselben Druck hervor. Man konnte berechnen, daß ein Sauerstoffmolekül bei 0° eine Geschwindigkeit von 461 *m*, Stickstoff 492 *m*, Wasserstoff 1844 *m* besitzen muß.

Wenn ein Gas erwärmt wird, so kann zweierlei eintreten: Befindet es sich im geschlossenen Gefäß, so behält es sein Volumen

und bekommt eine größere Spannkraft; befindet es sich im offenen Gefäß, so bekommt es ein größeres Volumen und behält dieselbe Spannkraft. Beide Erscheinungen erklärt man dadurch, daß durch die Erwärmung die Geschwindigkeit der Gasmoleküle größer wird. Befindet sich dabei das Gas im geschlossenen Raum, so schlagen nun die Moleküle öfter und mit größerer Wucht gegen die Wände und bringen dadurch den größeren Druck hervor. Ist das Gefäß offen, so sind die Moleküle wegen der erlangten größeren Geschwindigkeit (öfteres Anschlagen) zunächst imstande, die ihnen benachbarten kälteren Moleküle zurückzudrängen; das Gas dehnt sich aus. Aber das durch Wärme ausgedehnte Gas ist nun doch imstande, denselben Druck auszuüben wie vorher; denn es ist zwar das Gas durch seine Ausdehnung dünner geworden, es befinden sich also vor einer Fläche (*qcm*) nicht mehr so viele Moleküle; aber dieselben haben nun eine größere Geschwindigkeit und schlagen relativ öfter und mit größerer Wucht gegen die Wand. Was ihnen also an Anzahl (Dichte) abgeht, ersetzen sie nun durch größere Geschwindigkeit und bringen so denselben Druck wieder hervor.

Es spielt somit in bezug auf den Druck eines Gases dessen Wärme eine wesentliche Rolle, da mit der Temperatur der Druck desselben wächst; der Druck ist ja abhängig von der Geschwindigkeit der Moleküle, diese aber von der Temperatur. Kühlt man ein Gas immer mehr ab, so nimmt auch die Geschwindigkeit der Moleküle immer mehr ab; man kann berechnen, daß bei —274° die Moleküle gar keine Geschwindigkeit mehr haben können, das Gas also keine Expansionskraft mehr hat; man nennt deshalb diese Temperatur von —274° den absoluten Nullpunkt der Temperatur.*)

Fünfter Abschnitt.

Magnetismus.

81. Einfache Gesetze des Magnetismus.

Man findet in der Natur ein Eisenerz, Magneteisenstein, von welchem manche Stücke die Eigenschaft haben, kleine Eisenstückchen anzuziehen. Diese Eigenschaft nennt man Magnetismus und das Mineral einen natürlichen Magnet; beide waren schon

*) Man bemerke jedoch, daß die eben besprochene mechanische Gastheorie, obwohl sie eine einfache und leichtverständliche Erklärung sämtlicher Eigenschaften der Gase liefert, doch nur den Wert einer Theorie (Anschauungsweise) hat, weil sie auf der nicht bewiesenen Hypothese (Annahme) der fortschreitenden Bewegung der Moleküle beruht.

den Alten bekannt. Wir beschäftigen uns mit den künstlichen Magneten, deren Herstellung bald beschrieben werden wird.

Ein künstlicher Magnet ist ein Stück Stahl, welches die Eigenschaft besitzt, ein anderes Stück Eisen oder Stahl anzuziehen; der Magnet übt also eine anziehende Kraft aus, die magnetische Kraft. Wenn man einen Magnet auf eine Spitze leicht drehbar und frei beweglich stellt, so findet man, daß das eine Ende sich nach Norden, das andere nach Süden zu richten sucht, und der Magnet nicht zur Ruhe kommt, bis er die Richtung von Süd nach Nord angenommen hat. Einen so aufgestellten Magnet nennt man auch eine Magnetnadel, ihr nach Norden gerichtetes Ende den Nordpol, das andere den Südpol.

Durch Nähern der Pole zweier solcher Magnetnadeln findet man, daß Nord- und Nordpol sich abstoßen, ebenso Süd- und Südpol, daß aber Nord- und Südpol sich anziehen: **Gleichnamige Pole stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an.** Es scheinen demnach in einem Magnete zwei Arten magnetischer Kraft vorhanden zu sein, die nordmagnetische und die südmagnetische Kraft.

Wie in einem stabförmigen Magnete die magnetische Kraft verteilt ist, ersieht man ungefähr, wenn man ihn auf Eisenfeilspäne legt und emporhebt; an der Menge der angezogenen Späne erkennt man, daß der Magnetismus in der Nähe der Enden des Stabes am größten ist, weshalb man diese Enden eben die Pole nennt, daß er gegen die Mitte zu rasch abnimmt, und daß der Stab in der Mitte ganz unmagnetisch erscheint; diese Stelle nennt man die neutrale oder indifferente Zone.

Jeder Magnet hat stets beide Pole und in gleicher Stärke, denn versucht man, die beiden magnetischen Kräfte zu trennen, etwa durch Zerbrechen des Magnetstabes, so ist jedes, auch das kleinste Stück, selbst wieder ein vollständiger Magnet, dessen Pole in derselben Richtung liegen, wie die des ursprünglichen Magnetes.

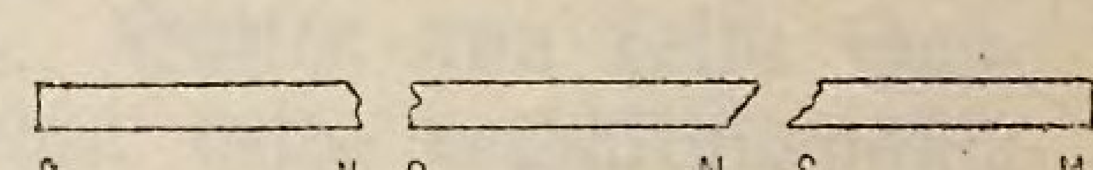


Fig. 102.

82. Magnetische Influenz.

Wenn man einem Magnetpole ein Stück weiches Eisen nähert, so wird es angezogen und dabei selbst magnetisch; in ihm wird durch das Annähern magnetische Kraft erregt, influenziert, und zwar bekommt es am genäherten Ende einen dem einwirkenden Pole ungleichnamigen, am entfernten Ende einen gleichnamigen Magnetismus; beides ist leicht nachzuweisen.

Das magnetische Doppelpendel besteht aus zwei Stückchen Eisen, die an gleich langen Fäden an einem Punkte aufgehängt sind. Nähert man ihnen einen Magnetpol, so sieht man, daß sie von demselben

angezogen werden; zugleich aber stoßen sie sich gegenseitig ab, da sie an den benachbarten Enden gleichen Magnetismus haben.

Hängt man an einen Magnetpol ein Stück weiches Eisen, so kann man an dessen freies Ende, weil es jetzt selbst magnetisch ist, ein zweites Eisenstück hängen; dies wird auch magnetisch; deshalb kann man an dessen freies Ende ein drittes Stück hängen, und so mehrmals nach einander. Nimmt man einen hufeisenförmigen Magnet, so kann man zwischen dessen Polen leicht eine Kette von vielen Eisenstückchen, etwa Nägeln, bilden, deren Enden sich um so besser anziehen, als sie von den beiden Magnetpolen Magnetismus bekommen.

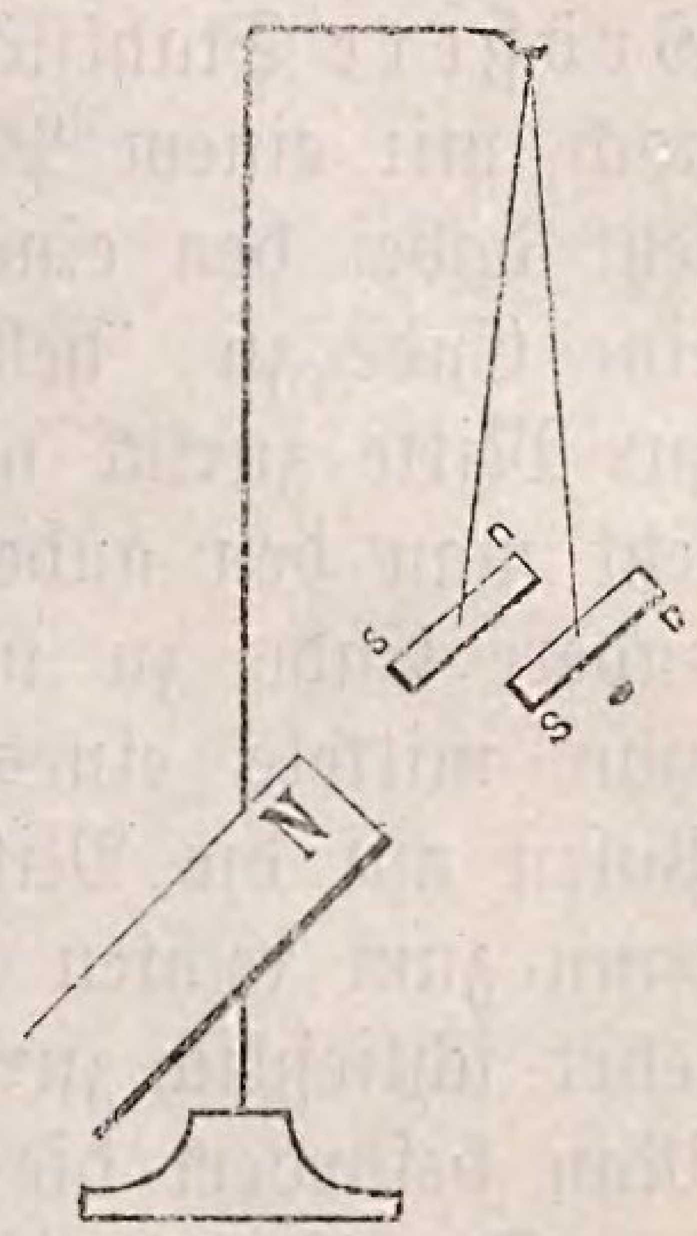


Fig. 103.

Diese Erregung der magnetischen Kraft in einem Stück Eisen durch Annäherung an einen Magnetpol nennt man magnetische Influenz. Sie ist um so stärker, je mehr man das Eisen dem Pole nähert, ist also am größten, wenn es den Pol berührt. Entfernt man das Eisen, vom Pole, so verliert es seine magnetische Kraft wieder, es wird unmagnetisch; reißt man also ein Stück Eisen vom Pole ab, so fallen auch alle am Eisen hängenden Eisenstücke ab.

83. Stahlmagnete.

Nähert man ein Stück Stahl einem Magnetpole, so wird es angezogen und durch Influenz auch magnetisch; entfernt man es vom Pole, so *behält es Magnetismus*, ist also selbst ein bleibender, *permanenter* Magnet geworden.



Fig. 104.

Weiches Eisen verliert beim Entfernen vom Pole den Magnetismus, jedoch nicht ganz; stets bleibt wenigstens eine Spur Magnetismus zurück, *remanenter Magnetismus*, aber um so weniger, je weicher das Eisen ist.

Weiches Eisen wird beim Annähern an den Magnet stärker magnetisch als Stahl; letzterer wird um so schwächer magnetisch, je härter er ist, und wird deshalb auch um so schwächer angezogen. Glasharter Stahl wird nur wenig magnetisch und deshalb nur schwach angezogen. Aber je besser der Stahl ist, um so besser behält er auch den einmal durch Influenz erhaltenen Magnetismus.

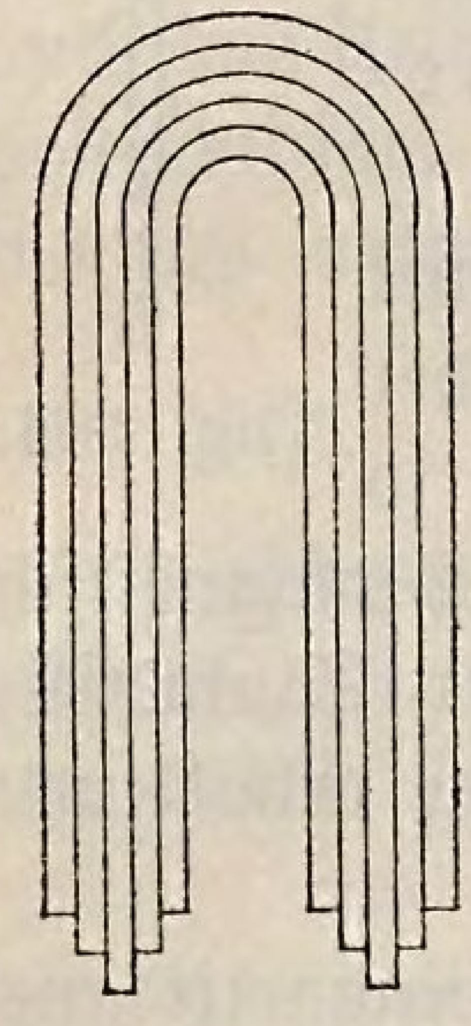
Auf der Eigenschaft des Stahles, influenzierten Magnetismus behalten zu können, beruht die *Herstellung künstlicher Magnete*, zu denen man Stahl von mäßiger Härte, geringer Sprödigkeit und hoher Elastizität benützt.

Bei *kleinen* Nadeln genügt ein Anlegen der Nadel mit ihren

beiden Enden an die beiden Pole eines kräftigen Hufeisenmagnetes und einiges Hin- und Herschieben, um sie genügend zu magnetisieren. Größere Stahlstäbe macht man magnetisch, indem man sie der Länge nach mit einem Pole eines kräftigen Magnetes bestreicht. Man setzt dabei den einen Pol auf die Mitte auf und streicht gegen das eine Ende zu, hebt dort den Pol ab und kehrt in großem Bogen zur Mitte zurück und wiederholt denselben Strich mehrmals; dann setzt man den anderen Pol auf die Mitte auf und streicht gegen das andere Ende zu und wiederholt auch das mehrmals. Magnetisiert man mittels eines Hufeisenmagnetes, so setzt man ihn mit beiden Polen auf die Mitte des Stabes, streicht von da zum linken Ende, dann zum rechten und so mehrmals, ohne je den Magnet aufzuheben, kehrt schließlich zur Mitte zurück und hebt das Hufeisen von dort ab. Man befördert die Erregung eines starken Magnetismus, indem man den Stahlstab auch auf der anderen Seite bestreicht, an die beiden Enden Eisenstücke legt und den Stab während des Bestreichens erschüttert. Wenn man mit demselben Pole nach rückwärts streicht, schwächt man den schon influenzierten Magnetismus, hebt ihn auf und ruft dann den entgegengesetzten hervor; eine Magnetnadel, so an die Pole eines kräftigen Magnetes gehalten, daß sich gleichnamige Pole berühren, wird nicht weggestoßen, wie man vermuten sollte, sondern erhält durch Influenz des Magnetes andere, umgekehrte Pole, so daß sie angezogen wird und nun auch diese umgekehrten Pole behält.

84. Stärke des Magnetismus.

Unter absoluter Tragkraft eines Magnetes versteht man das Gewicht, das ein Pol desselben tragen kann. Sie ist bei großen Magneten größer als bei kleinen, hängt auch ab von der Güte des Stahles und von der Stärke des Magnetes, der zum Magnetisieren benutzt wurde. Man kann jedoch die Tragkraft eines Magnetes nicht beliebig hoch steigern, sondern dieselbe nähert sich einer Grenze, über welche hinaus der Magnetismus nicht wachsen kann. Dieser Grenze, dem Sättigungsgrade, kann man sich um so mehr nähern, je kleiner der Magnet ist; große bleiben stets weit von ihr entfernt.


Fig. 105.

Ist ein Magnet hufeisenförmig gestaltet, und hängt man an seine beiden Pole ein einziges Stück weiches Eisen (Anker), so trägt er an demselben viel mehr Gewichte als an beiden einzelnen Polen zusammen; denn beide Pole wirken in demselben Sinne influenzierend auf den Anker. Belastet man den Anker ganz allmählich, indem man etwa von Tag zu Tag ein kleines Gewichtlein zulegt, so wächst die Tragkraft des Magnetes ziemlich stark; fällt

aber der Anker endlich ab, so geht die Tragkraft des Magnetes zurück und kann durch öfteres Abreißen des Ankers auf die ursprüngliche Größe reduziert werden.

Unter relativer Tragfähigkeit versteht man das Verhältnis des getragenen Gewichtes zum Gewichte des tragenden Magnetes. Sie ist bei kleinen Magneten viel beträchtlicher als bei großen; so kann ein Magnet von 1 *g* Gewicht wohl 50 *g*, einer von 10 *g* kann 300 *g* also das 30fache tragen, einer von 100 *g* trägt etwa 2000 *g*, das 20fache, einer von 500 *g* etwa nur 6000 *g*, also das 12fache; noch größere tragen verhältnismäßig noch viel weniger. Dies kommt wohl daher, daß bei kleinen Stücken der Stahl gleichmäßiger beschaffen ist, durchaus dieselbe Elastizität hat, und daß die Influenzwirkung des Magnetes, den man zum Magnetisieren benutzt, auch die Innenteile des Stahlstückes beeinflussen kann, was bei großen Magneten nicht der Fall ist; ein großes (dickes) Stahlstück wird beim Streichen nur in den äußeren Schichten magnetisch, während der Kern unmagnetisch bleibt. Sehr starke Magnete setzt man deshalb aus einzelnen Stücken zusammen, indem man mehrere Stäbe von geringer Dicke (Blätter, Lamellen) einzeln magnetisch macht und dann mit gleichen Polen auf einander legt (Lamellenmagnet Fig. 105), oder durch geringe Zwischenräume getrennt mit gleichen Polen in zwei weiche Eisenstücke (Polschuhe) einsteckt (Magnetisches Magazin, Fig. 106).

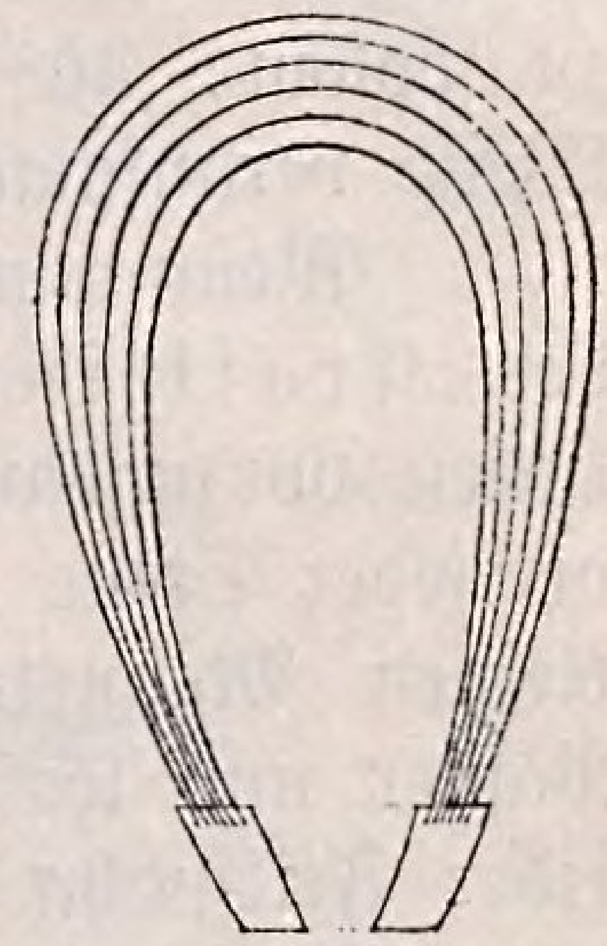


Fig. 106.

Wir werden später sehen, wie man sehr kräftige Magnete auch noch auf andere Art herstellen kann.

85. Theorie des Magnetismus.

Um die verschiedenen Erscheinungen des Magnetismus zu erklären, stellte Ampère folgende Theorie auf.

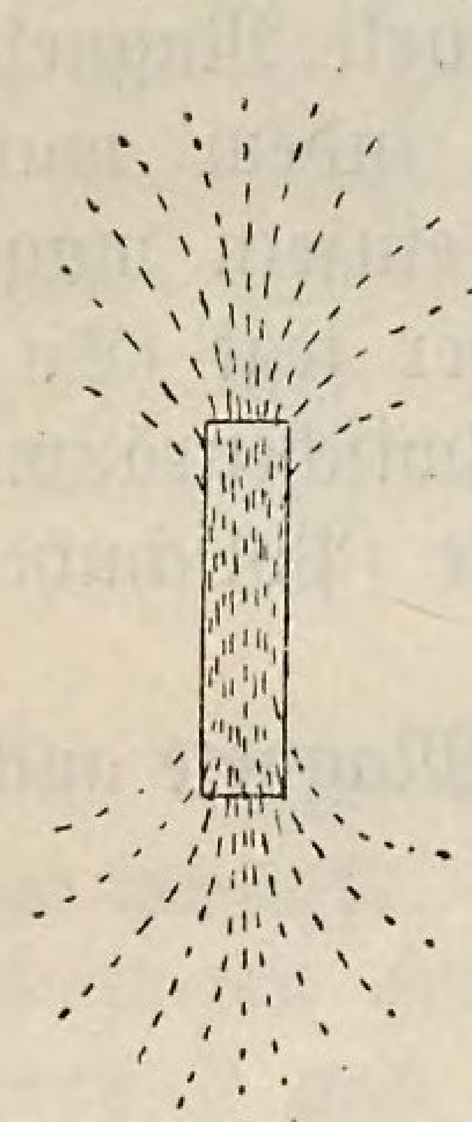
Man nimmt an, jedes Eisenmolekül sei selbst ein vollständiger Magnet. Im unmagnetischen Eisen liegen sie mit ihren Achsen so regellos, daß nach außen sich keine Wirkung zeigt. Die Moleküle seien drehbar. Wenn nun die Moleküle alle so gedreht sind, daß alle gleichnamigen Pole nach derselben Richtung schauen, polar angeordnet oder polarisiert sind, so wirken sie nach außen wie ein Magnet, und zwar am Pol am stärksten, weil auf den Pol zu alle Molekularmagnete in gleichem Sinne wirken, gegen die Mitte zu schwächer, weil dort rechts und links liegende Stücke sich in ihrer Wirkung aufheben.

Ein Magnet wirkt auf weiches Eisen dadurch, daß er dessen Molekularmagnete polarisiert; doch kehren beim Entfernen des Magnetes die Moleküle des weichen Eisens wieder fast vollständig in die

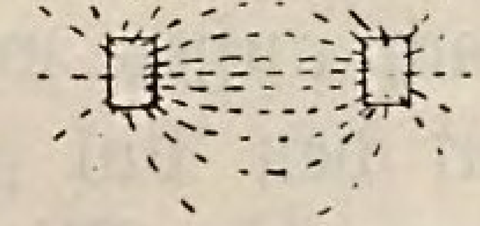
regellose Anordnung zurück, während die des Stahles fast vollständig in der polaren Anordnung bleiben. Je vollständiger die Molekularmagnete in polare Lage gebracht sind, desto stärker ist der Magnetismus; ein Magnet ist gesättigt, wenn alle Moleküle vollständig polarisiert sind.

Außer dieser Theorie, welche aus der Hypothese der Molekularmagnete die Erscheinungen des Magnetismus erkärt, hat man in neuester Zeit, ohne die Erscheinungen des Magnetismus erklären zu wollen, die Wirkung des Magnetes nach außen auf folgende Weise veranschaulicht.

Wenn ein Magnet nach außen wirkt, so geschieht dies längs der Kraftlinien. Bei einem Stabmagnete strahlen die Kraftlinien vorzugsweise von den Polflächen aus, und ihre Richtung wird an jeder Stelle angegeben durch die Richtung einer dort befindlichen kleinen Magnetnadel. Streut man Eisenfeilspähne auf ein Blatt Papier und legt unter das Papier einen Magnetstab, so dreht sich jeder Feilspahn in die Richtung der zugehörigen Kraftlinie, so daß deren strahlenförmige Anordnung ein gutes Bild vom Verlauf der Kraftlinien gibt. Stellt man sich vor, daß die Kraftlinien auch im Innern des Magnetstabes verlaufen, so erkennt man, daß sie alle den Magnetstab der Länge nach durchsetzen und dann büschelförmig in die Luft ausstrahlen. In der Nähe der Pole sind die Kraftlinien am dichtesten beisammen und treten mit der Entfernung vom Pol immer weiter auseinander.


Fig. 107.

Eine Fläche, welche senkrecht zu den Kraftlinien steht, wird ein magnetisches Feld genannt. Die Stärke eines magnetischen Feldes wird bemessen nach der Anzahl der Kraftlinien, welche die Flächeneinheit des Feldes treffen; je stärker ein magnetisches Feld ist, je mehr Kraftlinien also seine Flächeneinheit durchsetzen, desto stärker wird ein im Feld befindlicher kleiner Magnet angezogen. Beim Stabmagnet ist das Feld am stärksten an den Polflächen, und die Stärke nimmt mit der Entfernung von den Polflächen ab, nahezu wie das Quadrat der Entfernung zunimmt.


Fig. 108.

Bei einem Hufeisenmagneten laufen die Kraftlinien so, daß die meisten direkt oder mit geringer Krümmung von Pol zu Pol laufen, nur wenige in den freien Raum ausstrahlen. Es liegt deshalb zwischen genäherten entgegengesetzten Polen ein starkes magnetisches Feld.

Ein in der Nähe eines Poles, also in einem magnetischen Feld befindliches Stück Eisen wird selbst magnetisch, Feldmagnet; es bewirkt dann, daß mehr Kraftlinien auf seine eigene Masse zugehen,

übt gleichsam eine anziehende und ansammelnde Kraft auf die in seiner Nähe verlaufenden Kraftlinien aus, so daß durch seinen Raum mehr Kraftlinien gehen, als wenn es nicht da wäre; es verstärkt dadurch sein Feld und die benachbarten. Es sieht so aus, wie wenn die Kraftlinien leichter durch Eisen als durch Luft gingen, und deshalb lieber den wiederstandslosen Weg durch das Eisen wählten.

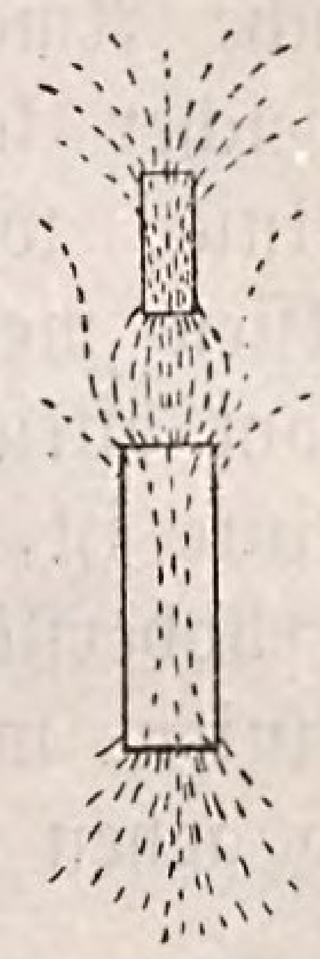


Fig. 109.

Ein Stück Eisen zwischen die Pole eines Hufeisenmagnetes gebracht, zieht auch die Kraftlinien in sich hinein. Ein Stück Eisen, welches die Pole eines Hufeisenmagnetes verbindet, zieht fast alle Kraftlinien durch sein Inneres, so daß ein solches Viereck nach außen keine oder fast keine Wirkung hervorbringt, Ringmagnet.

86. Kompaß, Deklination, Inklination.

Die wichtigste Anwendung des Magnetes besteht darin, daß man durch ihn die Himmelsrichtung auffindet; man benützt dazu eine in ihrer Mitte auf einer feinen Spitze leicht drehbar aufgesetzte Magnetnadel und nennt sie Kompaß oder Bussole. Die Nadel befindet sich dabei meist in einem mit Glasdeckel versehenen Kästchen (boussole heißt Kapsel) und spielt über einem Kreise, der in Grade oder in die Himmelsrichtungen geteilt ist.

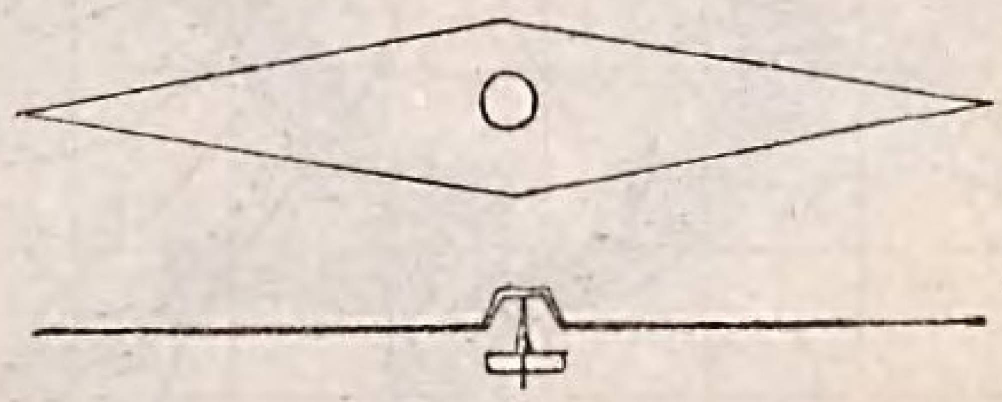


Fig. 110.

Auf einem Schiffe benützt, würde die Nadel wegen der Schwankungen des Schiffes an der freien Bewegung verhindert sein; man wendet deshalb die cardanische Aufhängung an: die Kapsel ist mit zwei gegenüberstehenden Stiften in einem Ringe drehbar befestigt, und der Ring selbst ist auch in zwei gegenüberstehenden Stiften drehbar befestigt, wobei deren Verbindungslinie senkrecht steht zu der der beiden anderen Stifte. Dadurch stellt sich der Boden der Kapsel, deren Schwerpunkt ziemlich tief liegt, stets horizontal, wie sich auch das Schiff dreht oder neigt.

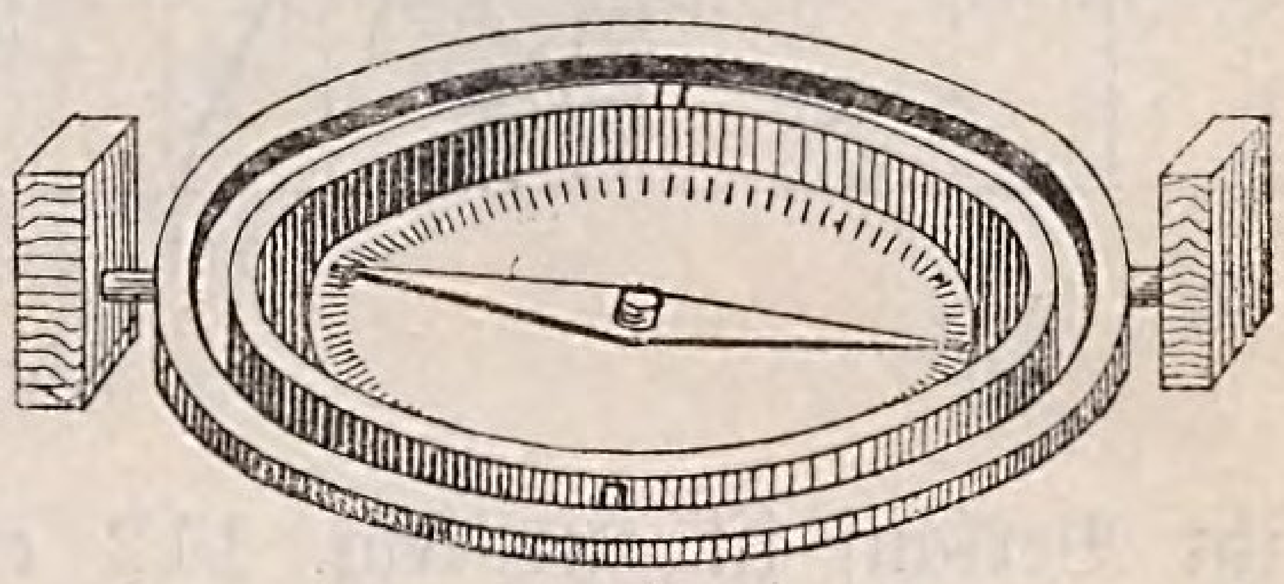


Fig. 111.

Da die Magnetnadel mit einem Ende gegen Norden zeigt — gewöhnlich ist dasselbe blau angelassen — so kann man mit ihr die Himmelsrichtung finden. Die Magnetnadel zeigt aber jetzt bei uns nicht genau nach Norden, sondern weicht von der Nordrichtung etwas nach Westen ab. Die Richtung der Magnetnadel, sowie auch eine durch sie gelegte Vertikalebene nennt man den magnetischen Meridian. Diese Abweichung der Magnetnadel von der Nord=

richtung nennt man *magnetische Deklination*. Sie ist bei uns ca. 10° westlich und von Ort zu Ort verschieden. Durch das östliche Amerika verläuft eine Linie ungefähr von N nach S, auf welcher keine Deklination vorhanden ist; sie heißt die *agonische* Linie; westlich von derselben wird die Deklination östlich, ist in Asien meist sehr gering bis zur zweiten agonischen Linie, welche vom östlichen Europa schräg gegen Australien zieht; westlich dieser Linie ist die Deklination westlich. Verbindet man alle Punkte der Erdoberfläche, welche denselben Betrag der Deklination haben, durch Linien, welche man *Isogonen*, Linien gleicher Deklination, nennt so gehen diese Linien in der Hauptrichtung von Nord nach Süd,

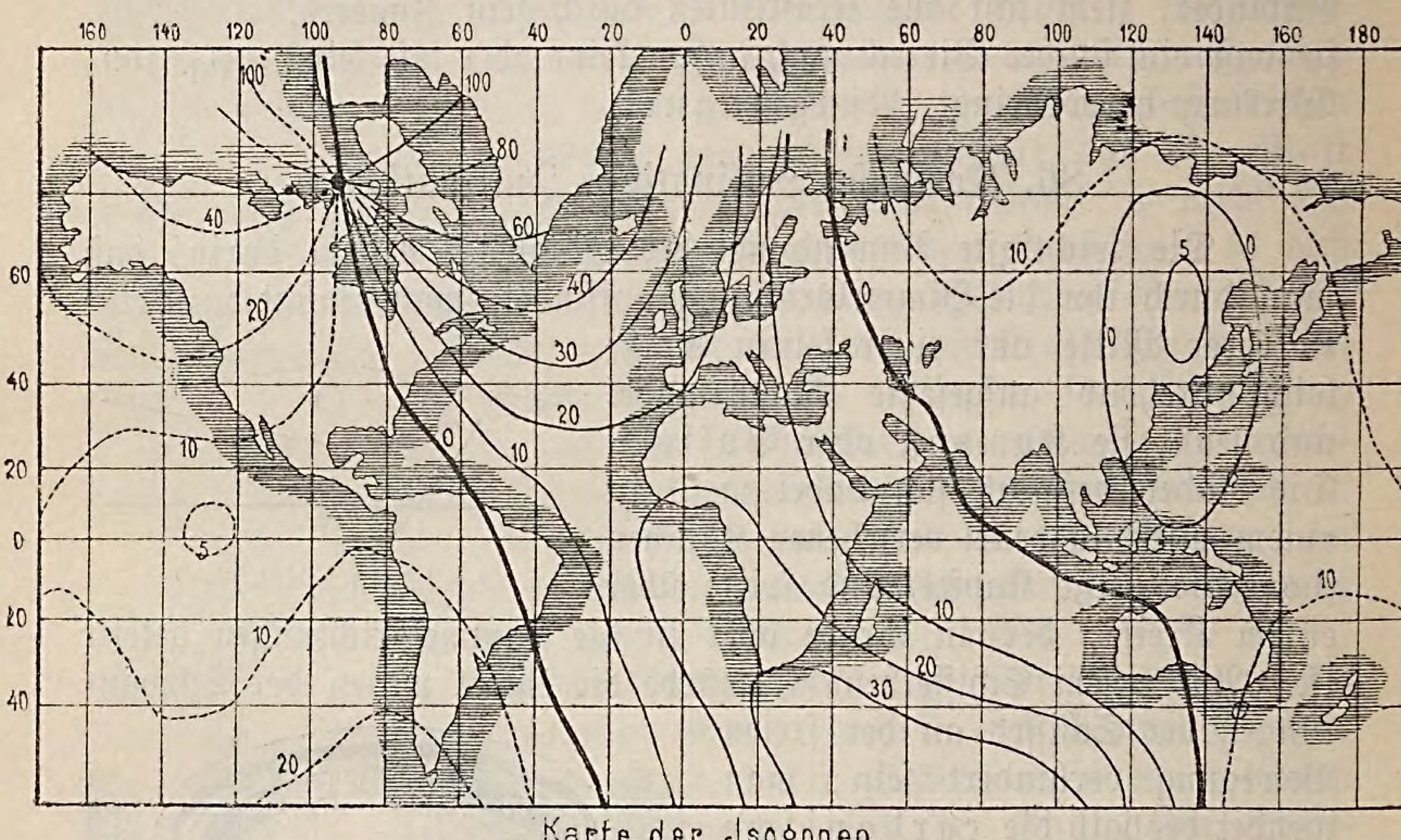


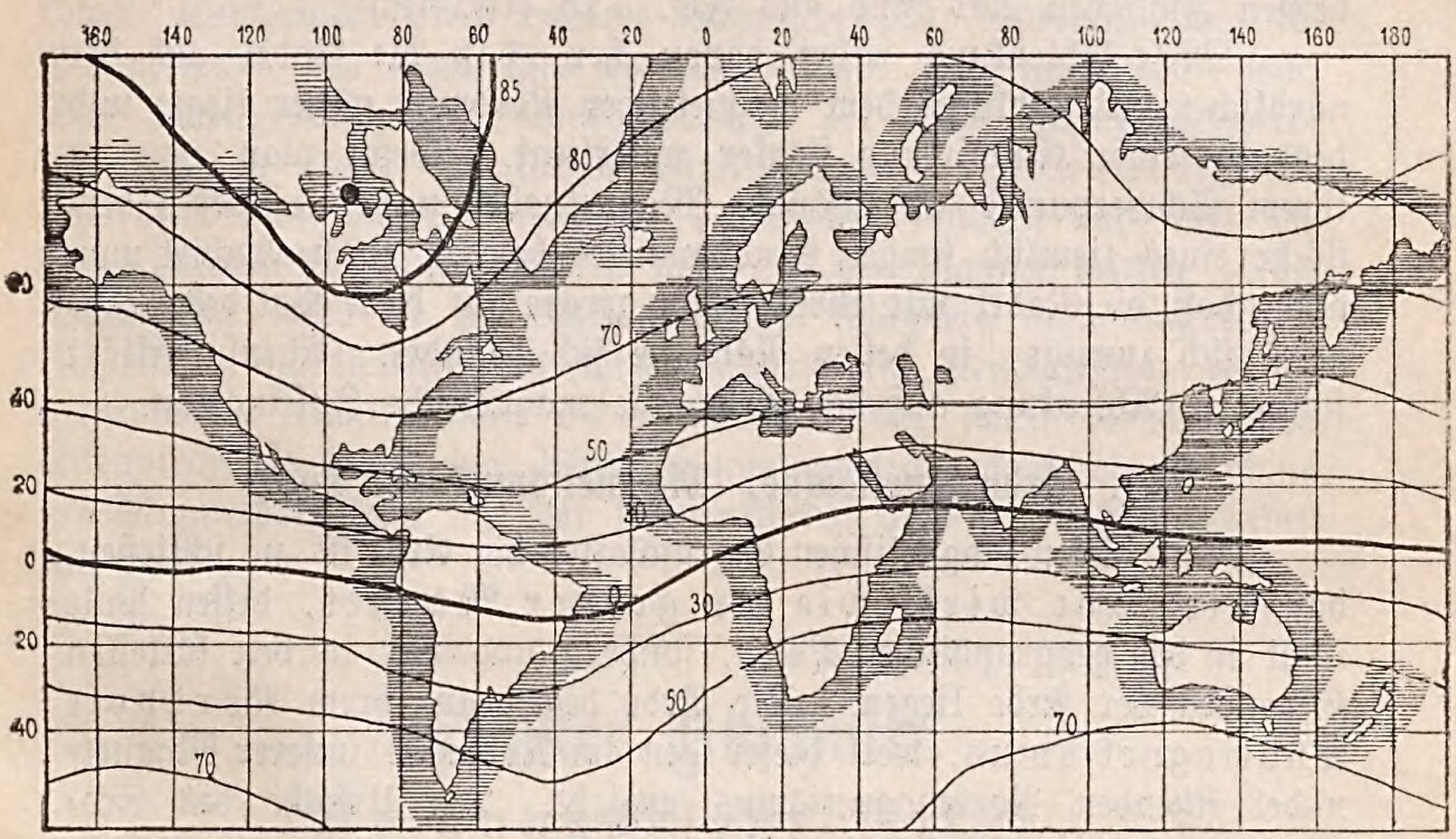
Fig. 112.

ihr Verlauf ist aus Fig. 112 ersichtlich. Ihren Schnittpunkt auf Boothia felix nennt man den *magnetischen Nordpol der Erde* (Rooß 1831); der im südlichen Eismeer vermutete magnetische Südpol der Erde ist noch nicht erreicht worden.

Will der Seefahrer mittels des Kompasses die Himmelsrichtung genau bestimmen, so muß er zunächst wissen, an welcher Stelle des Meeres, d. h. in welcher geographischen Länge und Breite er sich ungefähr befindet, und dann, wie groß die Deklination an diesem Orte ist; das letztere erfährt er aus Karten, in denen die Isogonen eingetragen sind, den Deklinationskarten, deren erste von Halley 1700 hergestellt wurde.

Die Deklination ändert sich beständig, nimmt bei uns jetzt eben ab, jährlich um etwa 0,16°, während sie früher zunahm und im Jahre 1814 ihren größten westlichen Betrag hatte. Diese Ände=

rung heißt die säkulare Änderung der Deklination. Ferner ändert sich die Deklination täglich; indem sie täglich eine kleine Schwankung von 8—15′ nach Ost und West macht; man nennt das die tägliche Variation (Graham 1722). Schließlich ändert sie



Karte der Jsoklinen.

Fig. 113.

sich hie und da unregelmäßig, plötzlich und stark, und kehrt dann zur normalen Größe zurück; diese Störungen treten meist gleichzeitig mit Nordlichtern auf, weshalb man dieselben auch magnetische Gewitter nennt. (Zuerst beobachtet von Halley 1716.)

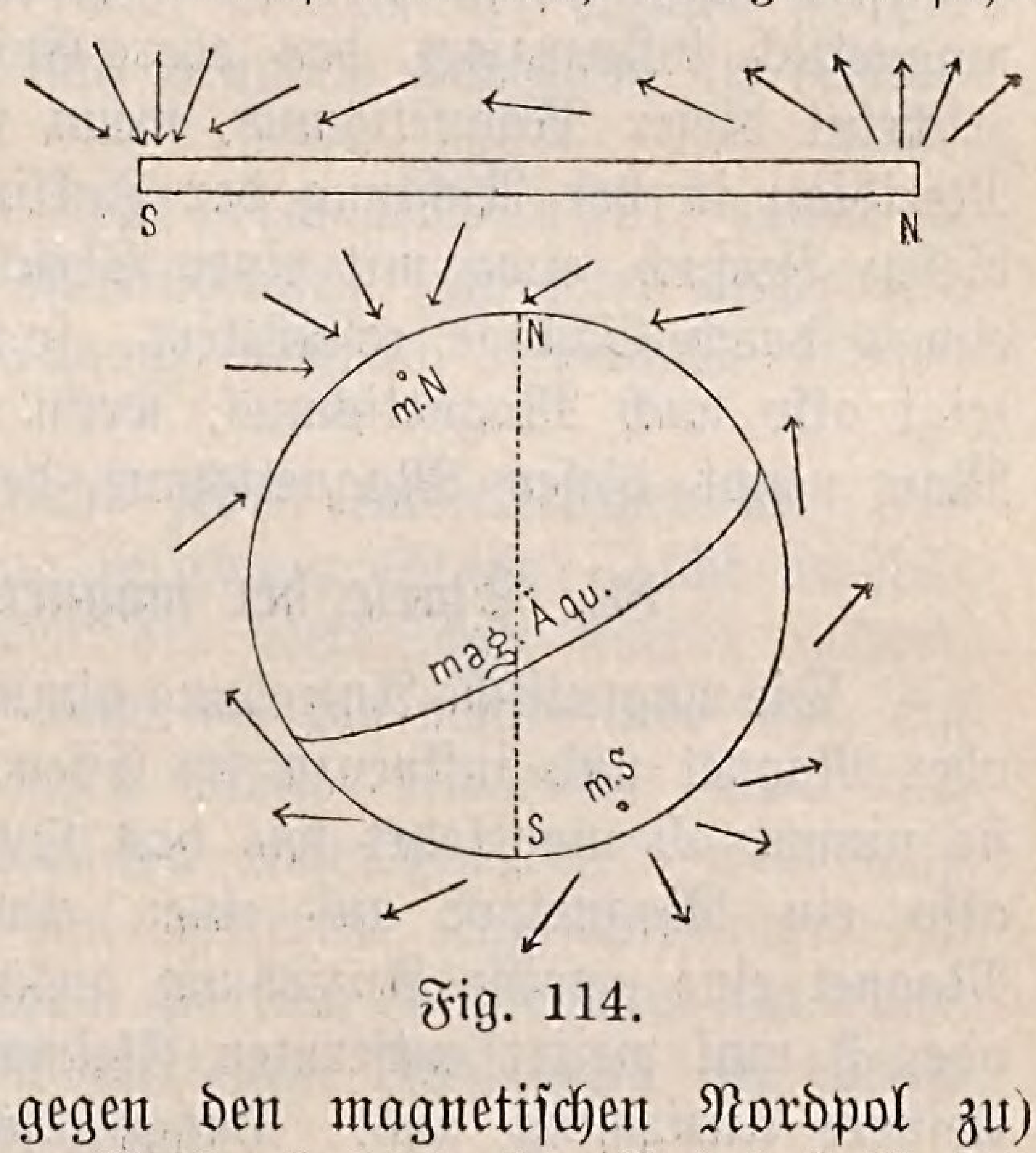


Fig. 114.

Wenn man eine in ihrem Schwerpunkte befestigte Magnetnadel um eine horizontale Achse frei schwingen läßt und in der Richtung des magnetischen Meridians hält, so findet man, daß sie bei uns mit dem Nordende sich nach abwärts neigt; diese Ablenkung von der horizontalen Lage nennt man magnetische Inklination. Sie beträgt bei uns über 60°, ist gegen Norden zu (besser gegen den magnetischen Nordpol zu) größer, beträgt am magnetischen Nordpol 90° (die Nadel stellt sich senkrecht zur Erdoberfläche) gegen den Äquator zu kleiner; auf einer

Linie, die in der Nähe des Äquators läuft, ist sie gar nicht vorhanden, magnetischer Äquator, und südlich derselben ist die Inklination auch südlich, d. h. die Nadel neigt das Südende nach abwärts. Linien, welche Punkte gleicher Inklination verbinden, heißen Isoklinen und sind aus Fig. 113 ersichtlich

Diese Ablenkung rührt davon her, daß die Nadel auf der nördlichen Erdhalbkugel dem magnetischen Nordpole näher liegt, und deshalb seiner Einwirkung stärker unterliegt. Wenn man eine in ihrem Schwerpunkte aufgehängte Magnetnadel nahe an der Oberfläche eines ziemlich langen Stabmagnetes bewegt, so beobachtet man auch, daß die Nadel mit ihrem Pole gerade auf den Pol des Magnetes sich zuneigt, in dessen Nähe sie sich befindet. Ebenso erklärt sich diese Ablenkung auf der Erde, die magnetische Inklination.

87. Erdmagnetismus, Magnetismus der Lage.

Aus diesen magnetischen Eigenschaften der Erde ist zu schließen, daß die Erde wirkt wie ein großer Magnet, dessen Pole nicht in den geographischen Polen, sondern ungefähr in den kältesten Gegenden der Erde liegen. Die Erde besitzt an ihrem Nordpole Südmagnetismus, weil dieser den im Nordende unserer Magnetnadel sitzenden Nordmagnetismus anzieht. Die Ursache des Erdmagnetismus ist unbekannt.

Aus dem Erdmagnetismus erklärt sich auch die Erscheinung, daß vertikal gestellte Eisenstäbe an eisernen Gittern, eiserne Träger u. s. w. sich als magnetisch erweisen, und zwar bei uns am unteren Ende Nordpol, am oberen Südpol besitzen. Denn das dem Nordpol der Erde nähere, untere Ende des Eisenstabes wird nordmagnetisch influenziert, das obere Ende südmagnetisch. Am stärksten erscheint dieser Magnetismus, wenn man den Stab im magnetischen Meridian in der Richtung der Inklinationsnadel hält. Macht man diesen Versuch etwa mit einer Stricknadel, die man in dieser Lage etwas durch Schläge erschüttert, so wird sie bleibend magnetisch, zeigt also auch Magnetismus, wenn man nun ihre Lage verändert. Man nennt diesen Magnetismus den Magnetismus der Lage.

88. Stärke der magnetischen Anziehung.

Die magnetische Anziehung nimmt ab, wenn die beiden Magnete, oder Magnet und influenziertes Eisen, von einander entfernt werden; sie nimmt ab umgekehrt wie das Quadrat der Entfernung. Wenn also ein Magnetpol auf einen etwa 10 *cm* entfernten (kleinen) Magnet eine gewisse Anziehung ausübt, so übt er auf denselben 2, oder 3 mal weiter entfernten (kleinen) Magnet eine 4 oder 9 mal kleinere Anziehung aus. Daher kommt es, daß diese magnetische Anziehung bei einigermaßen großer Entfernung verschwunden zu sein scheint, d. h. mit unseren Apparaten nicht mehr nachweisbar ist.

Die magnetische Anziehung wird nicht geschwächt oder verhindert durch Dazwischenschieben anderer Körper. So übt ein Magnetpol auf einen etwas entfernten Magnet dieselbe Anziehung aus, gleichgültig, ob Luft dazwischen ist, oder ob ein Brett, eine Mauer, Glas, Kupferblech oder anderes dazwischen ist. Deshalb darf die Magnetnadel des Kompasses von der Kapsel ganz umschlossen sein. Das Dazwischenschieben eines Körpers, der selbst magnetisch wird, hat dagegen einen wesentlichen Einfluß auf die Fernewirkung, da nun nicht bloß der Magnetismus des Poles, sondern auch noch die Magnetismen der influenzierten Pole auf den Magnet wirken. Eine Taschenuhr wird in der Nähe kräftiger Magnete auch magnetisch, (in ihren Stahlteilen) und wird dadurch am gleichmäßigen Gange verhindert. Umgibt man die Taschenuhr mit einem Gehäuse aus Eisenblech, so bleibt das Uhrwerk unmagnetisch, denn die Wirkung des Magnetpoles und die der influenzierten Pole des Gehäuses heben sich auf.

Sechster Abschnitt.

Reibungselektrizität.

89. Elektrizität durch Reibung entwickelt.

Wenn man Harz, Siegellack, Bernstein, Kautschuk oder Schwefel mit Wolle reibt, oder wenn man Glas mit Seide oder Leder reibt, so erhalten diese Körper die Kraft, andere Körper anzuziehen; diese Kraft nennt man Elektrizität; **manche Körper werden durch Reiben elektrisch und befinden sich dann in elektrischem Zustande.**

Man sieht dies leicht am elektrischen Pendel, einem an einem Seidenfaden aufgehängten Korkkügelchen. Es wird angezogen, wenn man ihm einen durch Reibung elektrisch gemachten Körper nähert.

Ein elektrischer Körper zieht jeden unelektrischen an; dies sieht man, wenn man Stücke von beliebigen Stoffen leicht drehbar aufstellt oder aufhängt und ihnen den elektrischen Körper nähert. Die elektrische Kraft wirkt also nicht wie die magnetische bloß auf bestimmte Stoffe, sondern auf jeden Stoff. Umgekehrt wird auch der elektrische Körper vom unelektrischen angezogen; denn wenn man einen elektrischen Körper, z. B. eine geriebene Kautschukstange, auf eine Spitze drehbar befestigt, so dreht sie sich, sobald man ihr einen unelektrischen Körper nähert. **Die elektrische Anziehung ist, ebenso wie die magnetische, eine gegenseitige.**

Prüft man das Verhalten zweier elektrischer Körper zu einander, indem man etwa eine Glasstange und eine Kautschukstange,

ähnlich wie eine Magnetnadel, auf einer Spitze drehbar aufstellt, sie durch Reiben elektrisch macht und ihnen nun ebenfalls geriebene Glas- und Kautschukstangen nähert, so findet man, daß die elektrischen Glasstangen sich abstoßen, ebenso die elektrischen Kautschukstangen. Man schließt also, daß zwei Körper, welche dieselbe Art Elektrizität besitzen, sich abstoßen, und sagt kürzer, zwei elektrische Kräfte derselben Art stoßen sich ab. Man findet aber, daß die elektrische Glasstange die elektrische Kautschukstange anzieht, und schließt also, daß die auf Glas und Kautschuk befindlichen Elektrizitäten nicht von gleicher Art sein können. Man erkennt so: **es gibt zwei Arten von Elektrizität,** die Glaselektrizität und die Kautschukelektrizität, und spricht das erste Grundgesetz der Elektrizität aus: **Gleichartige Elektrizitäten stoßen sich ab, ungleichartige ziehen sich an.**

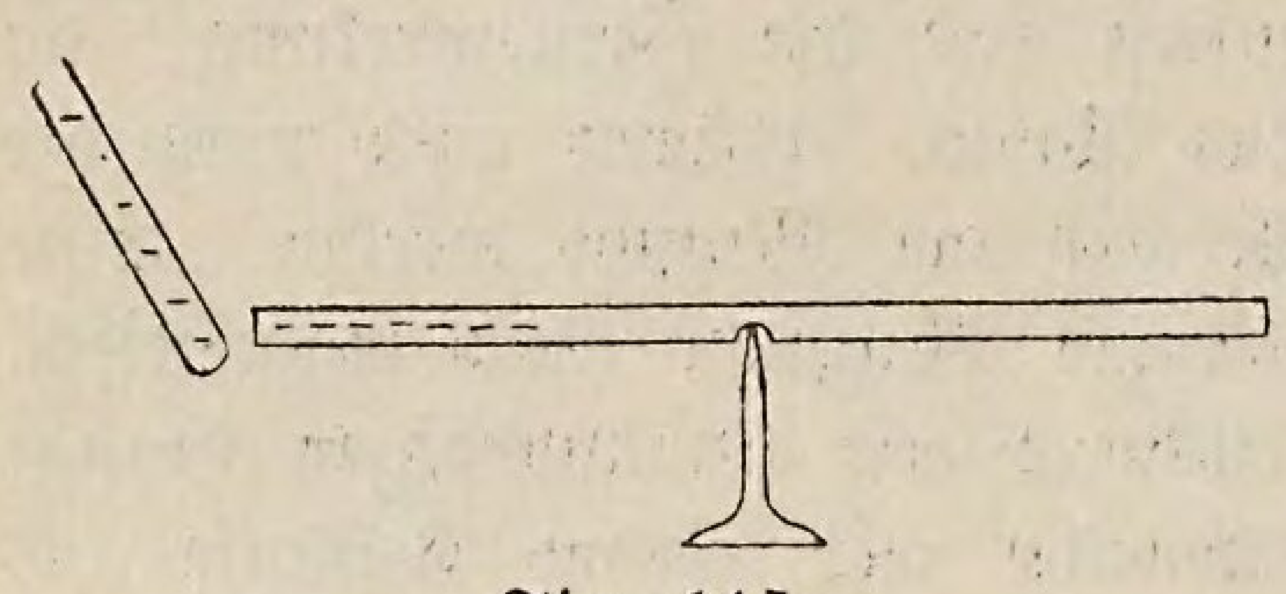


Fig. 115.

Prüft man nun alle anderen Körper, wie Siegellack, Schwefel u. s. w., indem man sie reibt und dann der elektrische Glas- und Kautschukstange nähert, so findet man, daß jeder elektrisch gewordene Körper entweder die Glasstange anzieht und die Kautschukstange abstößt, also so elektrisch wird wie Kautschuk, oder die Glasstange abstößt und die Kautschukstange anzieht, also so elektrisch wird wie Glas. Man schließt also, **es gibt nur zwei Arten von Elektrizität** (1733), und nennt die Glaselektrizität **die positive** (+) die Kautschukelektrizität die **negative** (—) Elektrizität. (Lichtenberg 1777).

Anstatt des Kautschuks bediente man sich früher meist des Harzes (Siegellackes, noch früher des Schwefels) und nannte diese Elektrizität die Harzelektrizität; jedoch sind all diese Bezeichnungen, sowie auch die mit + und — rein willkürlich.

Auf Glas und Kautschuk bleibt die Elektrizität an der Stelle sitzen, an welcher sie durch Reiben hervorgerufen wurde; man sieht dies leicht daran, daß die nicht geriebenen Stellen das elektrische Pendel nicht anziehen, sowie daran, daß die nicht geriebene Hälfte der Kautschuknadel von der geriebenen Kautschukstange angezogen wird. Man sagt, die Stoffe können die Elektrizität nicht leiten, sie sind **Nichtleiter der Elektrizität.** Zieht man aber die Glasstange etwa durch die feuchte Hand, durch den feuchten Schwamm, durch Stanniol, so hat sie ihre Elektrizität verloren; sie ist durch die Hand und den menschlichen Körper in die Erde geleitet worden; man sagt, der menschliche Körper, das Wasser, der Stanniol sind **Leiter der Elektrizität** (Gray 1729). Zu den Leitern gehören insbesondere alle Metalle und Wasser, zu den Nichtleitern gehören noch Seide,

Harz, besonders Schellack und (trockene) Luft. Halbleiter sind lufttrockenes Holz, Papier, Fischbein.

Wenn ein Leiter mit lauter Nichtleitern umgeben ist, so ist er **isoliert**, z. B. eine Messingkugel, welche auf einem Glasfuße steht, ist ein isolierter Leiter.

Wenn man eine isolierte Messingstange am einen Ende mit einem elektrischen Glasstabe bestreicht, so tritt von den Berührungsstellen aus die Elektrizität vom Glase auf die Messingstange und verbreitet sich gleichmäßig auf derselben, wie man daran sehen kann, daß sie nun mit jedem, auch dem nicht bestrichenen Teile die elektrische Glasnadel abstößt.

90. Elektroskop.

Zu den weiteren Untersuchungen ist besonders dienlich das Elektroskop; es besteht aus einem Messingstift, der oben eine Messingkugel, unten zwei nebeneinander hängende feine Goldblättchen trägt; der Stift ist durch den Stopfen einer Gasflasche gesteckt, so daß die Blättchen im Innern der Flasche sich befinden. Die Luft im Innern wird durch eingelegtes geschmolzenes Chlorkalzium trocken erhalten, so daß der Metallkörper des Elektroskops möglichst gut isoliert ist.

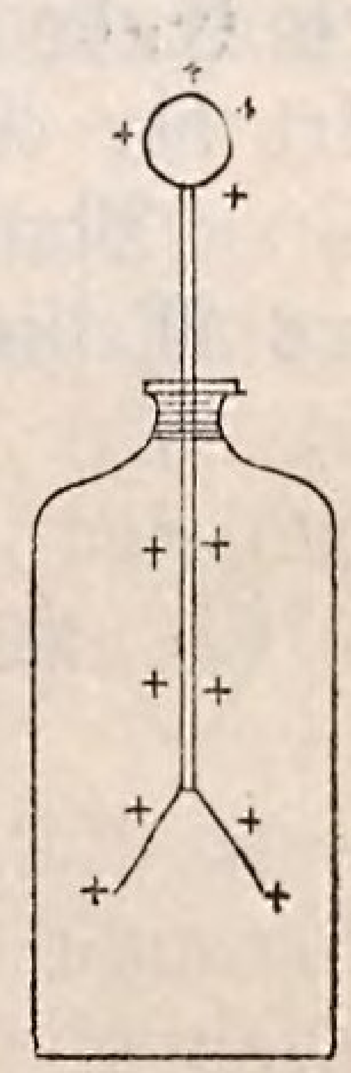


Fig. 116.

Teile ich dem Kopfe des Elektroskopes etwas Elektrizität durch Berühren (Bestreichen) mit der elektrischen Glasstange mit, so stoßen sich die Goldblättchen ab und divergieren; denn die mitgeteilte Elektrizität hat sich auf die Blättchen verbreitet, dieselben haben gleiche Elektrizität und stoßen also einander ab.

Wenn man nun dem Knopfe auch noch — E mitteilt durch Bestreichen mit dem elektrischen Kautschukstabe, so sieht man, daß die Blättchen wieder zusammenklappen, und zwar klappen sie ganz zusammen, wenn man die richtige Menge Elektrizität hinzubringt; man schließt also, daß + und — Elektrizität sich aufheben. Nennt man solche Mengen Elektrizität einander gleich, welche sich gerade aufheben, so heißt der zweite Hauptsatz der Elektrizität:

Gleiche Mengen positiver und negativer Elektrizität heben sich auf, neutralisieren sich.

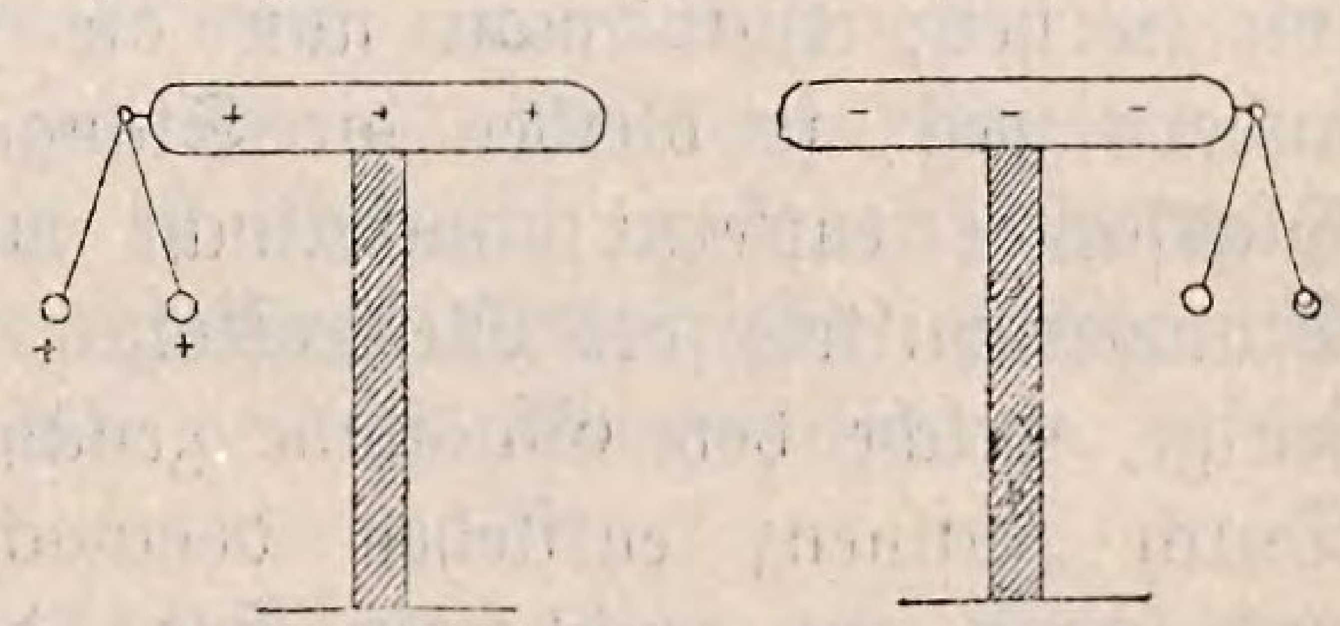


Fig. 117.

Der Beweis dieses wichtigen Satzes kann auch durch folgenden Versuch geliefert werden. Man hat zwei gleich große Metallstangen wagrecht auf Glasfüßen befestigt und an je einem Ende der Stangen hängt ein Doppelpendel von Holundermarkkügelchen.

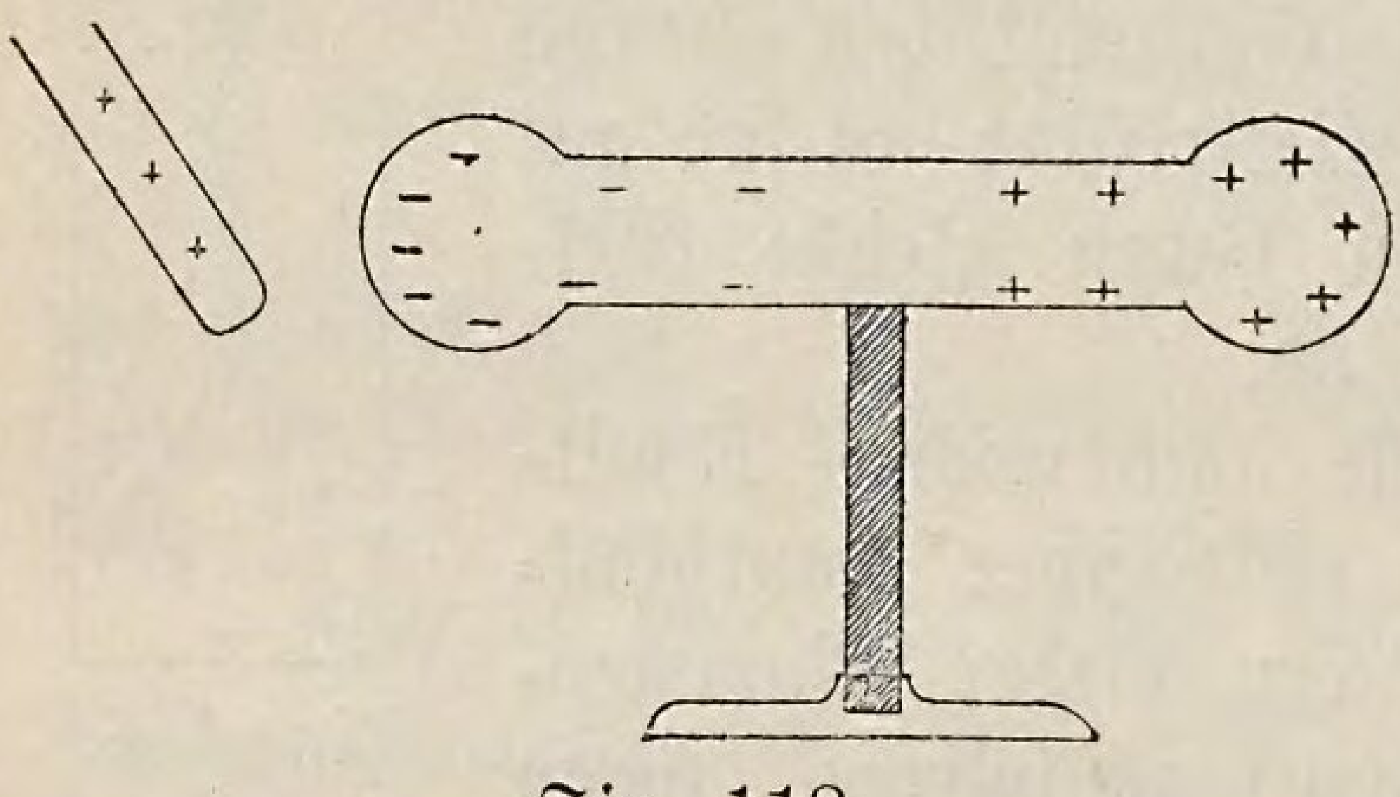
Man teilt dem einen Stabe + E mit durch Bestreichen mit der elektrischen Glasstange und dem anderen — E, mittels der Kautschukstange, wo möglich gleich viel, was man an der Divergenz der Doppelpendel ungefähr erkennt. Nähert man nun die elektrischen Stäbe einander, bis sie sich berühren, so klappen im Momente der Berührung die Doppelpendel zusammen, da sich + und — E ausgleichen.

Teilt man dem Knopfe des Elektroskopes durch Berührung mit der elektrischen Glasstange + E mit, so nennt man es geladen mit positiver Elektrizität. Nähert man dem + geladenen Elektroskop eine elektrische Glasstange, so gehen die Blättchen weiter auseinander; nähert man ihm eine elektrische Kautschukstange, so klappen sie mehr zusammen. Hiedurch kann man mittels eines geladenen Elektroskopes leicht erkennen, welche Art Elektrizität ein Körper hat.

91. Elektrische Influenz.

Nähert man einen elektrischen Körper einem unelektrischen Leiter, so wird der Leiter selbst elektrisch, und zwar am genäherten Ende ungleichnamig, am entfernten Ende gleichnamig. Diese Art der elektrischen Erregung nennt man **elektrische Influenz.**

Man nimmt einen auf einem Glasfuße stehenden Cylinder aus Messingblech, an dessen Enden Doppelpendel angebracht sind, und nähert diesem isolierten Leiter etwa eine elektrische Glasstange, so sieht man, wie beide Doppelpendel divergieren, schließt also, daß der Leiter selbst elektrisch geworden ist. Stellt man die in Fig. 117 beschriebenen Metallstangen so zusammen, daß sie sich mit dem einen Paare ihrer Enden berühren, also einen einzigen Leiter vorstellen, und nähert die Glasstange, so divergieren die Doppelpendel wie vorher; rückt man nun die eine Metallstange etwas von der andern weg, so bleiben die Stangen elektrisch, auch wenn man die Glasstange entfernt; untersucht man die Elektrizitäten der beiden Stangen mittels des Elektroskopes, so zeigt die eine, und zwar diejenige, welche dem Glasstabe genähert war, — E, die andere + E.


Fig. 118.

Durch Influenz entstehen demnach beide Arten von Elektrizität, und zwar am genäherten Ende die ungleichnamige, die Influenzelektrizität 1. Art, am entfernten Ende die gleichnamige, die Influenzelektrizität 2. Art.

Wenn man die so geladenen Metallstangen wieder einander nähert, so klappen die Doppelpendel wieder zusammen, da sich + E

und — E neutralisieren, und da sie ganz zusammenklappen, so schließt man: **die Influenzelektrizitäten beider Arten sind an Menge gleich.**

Nähert man einem Elektroskop einen elektrischen Körper, etwa eine — Kautschukstange, so wird dessen Metallkörper influenziert, und zwar am Kopfe ungleichnamig (+), an dem Blättchen gleichnamig (—), weshalb dieselben divergieren. Entfernt man den elektrischen Körper wieder, so vereinigen sich die getrennten Influenzelektrizitäten wieder, weshalb die Blättchen zusammenklappen. Da die Blättchen leicht divergieren, so dient das Elektroskop insbesondere dazu, um zu untersuchen, ob ein (genäherter) Körper elektrisch ist.

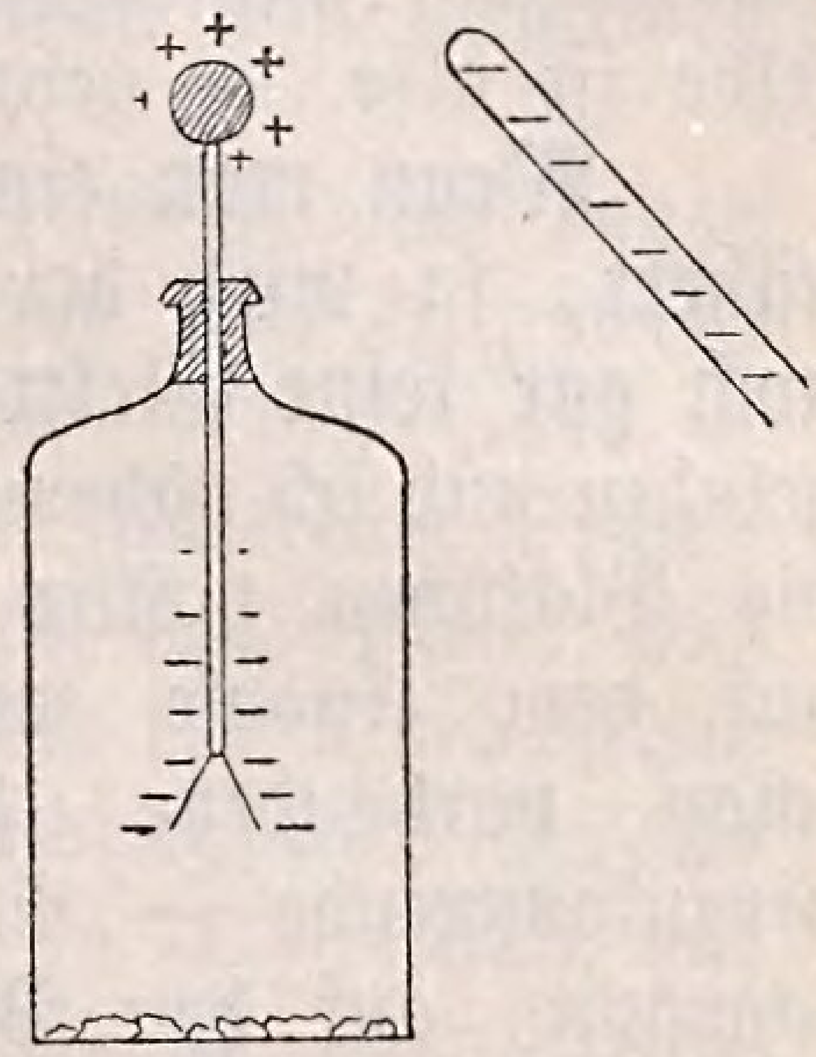


Fig. 119.

Auch bei der elektrischen Influenz findet ebenso wie bei der magnetischen kein Hinüberfließen der Elektrizität vom einen Körper zum anderen statt, sondern die Influenz ist eine Wirkung in die Ferne; **der influenzierende Körper ruft die Influenzelektrizität hervor, ohne etwas von seiner Elektrizität herzugeben oder zu verlieren.**

Die Influenzelektrizität ist ungleichmäßig über die Oberfläche des influenzierten Körpers verteilt. Die beiden Arten von Influenzelektrizität haben ihre größte Dichte am genäherten, resp. abgewendeten Ende und nehmen gegen die Mitte zu ab, so daß in der Mitte eine unelektrische Linie (Indifferenzzone) vorhanden ist (ein dort angebrachtes Doppelpendel divergiert nicht).

Man kann auch einen Leiter durch Influenzelektrizität dauernd elektrisch machen oder elektrisch laden auf folgende Art. Man nähert dem isolierten Messingcylinder etwa die + Glasstange, so wird er influenziert; berührt man ihn nun mit dem Finger, so fließt die positive Influenzelektrizität zweiter Art durch den Finger zur Erde, weil sie von der + Glasstange abgestoßen wird; es bleibt auf ihm die negative Influenzelektrizität erster Art, weil sie von der + Glasstange angezogen wird. Entfernt man nun den Finger und dann die Glasstange, so verbreitet sich die — Influenzelektrizität erster Art auf dem ganzen Leiter, **er ist elektrisch geladen, durch Influenzieren und Ableiten der Influenzelektrizität zweiter Art.** Macht man denselben Versuch mit der — Kautschukstange, so wird er positiv geladen.

Ebenso kann man ein Elektroskop laden mit Influenzelektrizität erster Art. Man nähert dem Knopfe etwa die + Glasstange, so wird der Knopf —, die Blättchen + influenziert. Berührt man nun den Knopf mit dem Finger, so fließt die + E der Blättchen ab, weil sie abgestoßen wird, was man daran er-

kennt, daß die Blättchen zusammenklappen. Entfernt man nun den Finger und dann die Glasstange, so verbreitet sich die im Knopfe verbliebene Influenzelektrizität erster Art über das Elektroskop; dasselbe ist also — geladen.

Wenn man einem geladenen Leiter einen elektrischen Körper nähert, so wird der Leiter gerade so influenziert, wie wenn er noch gar keine Elektrizität hätte. Ist also etwa das Elektroskop + geladen und ich nähere einen + Glasstab, so wird der Knopf negativ, die Blättchen positiv influenziert; auf dem Knopfe wird also die schon vorhandene + durch die hinzukommende — Elektrizität geschwächt, auf den Blättchen wird die schon vorhandene + durch die influenzierte + Elektrizität verstärkt, es gehen also die Blättchen noch weiter auseinander. Nähert man aber dem + geladenen Elektroskope einen — elektrischen Körper, so wird der Knopf +,

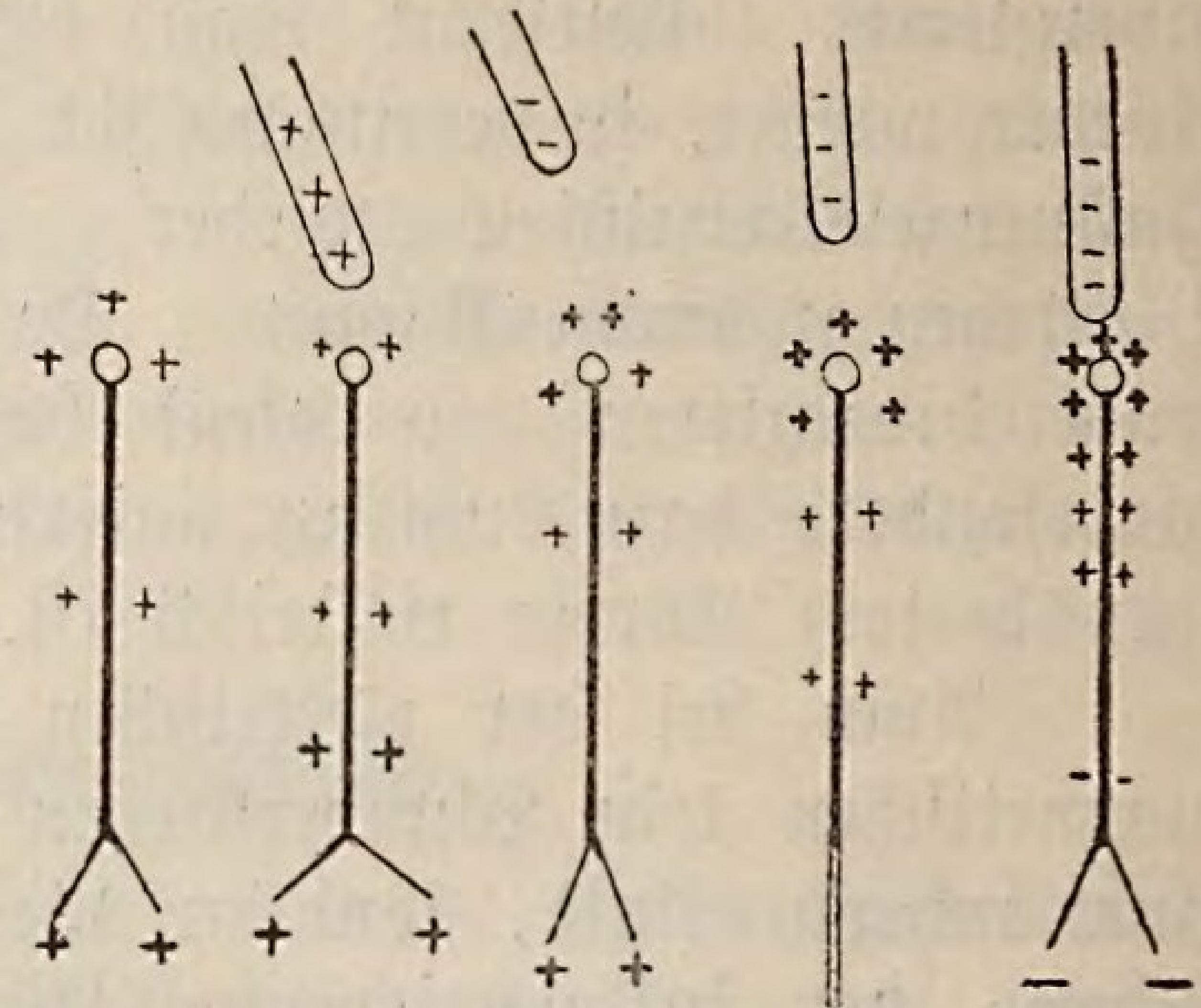


Fig. 120.

die Blättchen — influenziert; auf dem Knopfe wird also die schon vorhandene + durch die influenzierte + verstärkt, auf den Blättchen kommt zu der vorhandenen + noch — Influenzelektrizität dazu; es wird also zunächst die vorhandene + geschwächt, weshalb die Blättchen etwas zusammengehen; bei stärkerer Influenz wird die vorhandene + ganz aufgehoben, weshalb die Blättchen ganz zusammenklappen, und wenn die — Influenzelektrizität sogar stärker ist als die schon vorhandene +, so bleibt in den Blättchen — Influenzelektrizität übrig, weshalb die Blättchen wieder divergieren, aber jetzt mit — Elektrizität. Ebenso findet und erklärt man, daß bei einem — geladenen Elektroskop durch Annäherung eines — elektrischen Körpers die Blättchen stärker divergieren, dagegen bei Annäherung eines + elektrischen Körpers zusammengehen, ganz zusammenklappen und dann sogar wieder auseinander gehen, aber nun mit + Elektrizität. Das Elektroskop dient somit auch dazu, um zu untersuchen, welche Art Elektrizität der genäherte Körper hat.

92. Elektrizität geriebener Körper.

Wenn man Glas mit Leder reibt, so zeigt sich Glas + elektrisch, das Leder unelektrisch, weil seine Elektrizität durch die Hand abgeleitet wird. Wenn man aber ein Stückchen Leder auf einer isolierenden Siegellackstange befestigt, und nun mit dem Leder das Glas reibt, so zeigt sich das Glas +, das Leder — elektrisch, was man leicht am Elektroskop nachweisen kann. Das=

selbe kann man mit jedem Paare von Körpern thun, und man findet, daß **stets beide geriebenen Körper und stets entgegengesetzt elektrisch werden. Die Mengen der dabei erzeugten positiven und negativen Elektrizität sind einander gleich.**

Welche Art Elektrizität ein Stoff bekommt, hängt auch davon ab, mit welchem Stoffe er gerieben wird, ja sogar wie er gerieben wird; Ebonit*) wird mit Raubtierfell und Wolle —, mit Leder + elektrisch. Indem man ein Stück Metall auf eine isolierende Siegellackstange befestigt und nun reibt, kann man auch nachweisen, daß Metalle durch Reiben elektrisch werden; insbesondere ein Amalgam (d. i. eine durch Zusammenschmelzen erhaltene Verbindung) von Quecksilber (2 Teile) mit Zink (1 T.) und Zinn (1 T.) erhält mit Glas, englischem Flintglas, gerieben stets — Elektrizität; man streicht solches pulverförmiges Amalgam auf Leder, das man zuerst mit etwas Fett eingerieben hat und benützt es so vielfach als Reibzeug. Auch zwei chemisch ganz gleich beschaffene Körper geben an einander gerieben meistens Elektrizität, wenn nur ihre Oberflächen etwas von einander verschieden sind, oder ihre Wärme etwas verschieden ist (der wärmere wird negativ). Die Art des elektrischen Zustandes ist also nicht mit der Natur des Stoffes verknüpft, sondern von den jeweiligen Umständen abhängig.

In folgender Spannungsreihe sind die Stoffe so geordnet, daß jeder Stoff, mit einem der folgenden gerieben, + elektrisch wird, um so stärker, je weiter die Stoffe von einander abstehen.

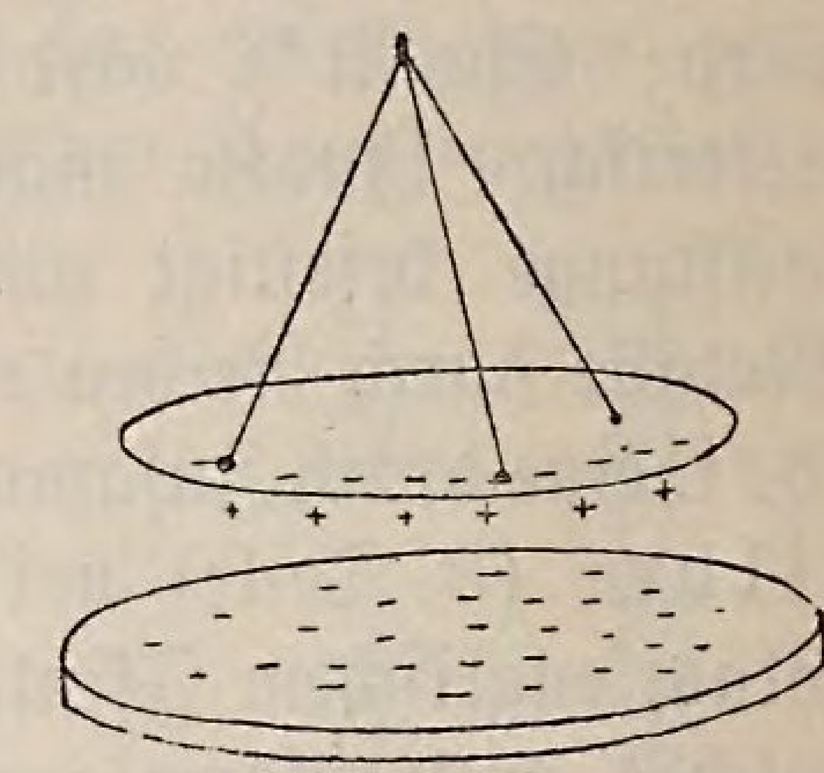
+
Engl. Flintglas,
Glimmer,
Raubtierfell,
Gewöhnl. Glas,
Flanell,
Mattes Glas,
Seide
Baumwolle
Leinen
....
Metalle
Kork
Harze
Ebonit
amalg. Leder,
Speckstein
—

93. Elektrophor (Volta 1775).

Der Elektrophor besteht aus einem Harzkuchen oder einer Ebonitplatte*) die durch Reiben oder Peitschen mit einem Fuchsschwanze — elektrisch gemacht wird; ferner aus einem Deckel oder Schild, das ist ein rundes Stück Blech oder mit Stanniol beklebter Pappendeckel, also ein Leiter, der an drei isolierenden Seidenfäden gehalten werden kann. Setzt man den Deckel auf die elektrische Platte, so wird der Deckel influenziert, unten + oben —; berührt man ihn nun mit dem Finger, so läuft die abgestoßene — Influenzelektrizität zweiter Art fort; und der Deckel behält die angezogene + Influenzelektrizität erster Art; entfernt man nun auch den Finger und hebt den Deckel am Seidenfaden in die Höhe, so hat er die

*) Ebonit ist vulkanisierter, d. h. mit Schwefel versetzter Kautschuk.

+ Influenzelektrizität, und zwar in ziemlich großer Menge, so daß sie schon in Form eines Funkens auf den genäherten Finger überspringt. Nimmt man dem Deckel seine Elektrizität, so kann man denselben Versuch vielmals wiederholen. **Der Elektrophor dient dazu, um größere Mengen Elektrizität zu erzeugen durch Influenz und Ableiten der Influenzelektrizität zweiter Art.**


Fig. 121.

Die Platte verliert dabei nichts von ihrer Elektrizität, oder doch nicht viel; denn nur in den wenigen Punkten, in denen der Deckel die Platte wirklich berührt, geht die negative Elektrizität der Platte wirklich auf den Deckel über, geht also verloren. Der Versuch gelingt auch, wenn man den Schild nicht bis zur vollständigen Berührung nähert, nur ist dann die influenzierte Elektrizität schwächer; die Platte verliert dann gar nichts von ihrer Elektrizität.

Bedeckt man den Elektrophor mit dem Schild, leitet diesen ab, und läßt ihn so an einem trockenen Orte stehen, so behält er Wochen, ja Monate lang seine Elektrizität. Denn die Elektrizität der Platte wird einerseits von der Elektrizität des Deckels, andererseits durch die auch influenzierte Elektrizität der (leitenden) Unterlage gegenseitig angezogen und so festgehalten.

94. Stärke der elektrischen Anziehung.

Die Kraft, mit welcher sich zwei elektrische Massen anziehen (oder abstoßen), hängt ab von der Menge der auf den Körpern befindlichen Elektrizität und ist dem Produkte dieser Mengen proportional. Wenn also etwa zwei gleiche Mengen Elektrizität sich gegenüberstehen und sich mit einer gewissen Kraft anziehen, so ziehen sich zwei Mengen, von denen die eine 3 mal, die andere 5 mal größer ist als die zuerst gewählten, mit einer Kraft an, die $3 \cdot 5 = 15$ mal größer ist als die zuerst vorhandene Kraft. Dabei war vorausgesetzt, daß die Elektrizitäten beidesmal denselben Abstand haben; befinden sich aber die Elektrizitäten in verschiedenem Abstande, so nimmt die Anziehung ab, wie das Quadrat des Abstandes zunimmt. **Die elektrische Anziehung ist also proportional dem Produkte der elektrischen Mengen und umgekehrt proportional dem Quadrate ihres Abstandes** (Coulomb.)

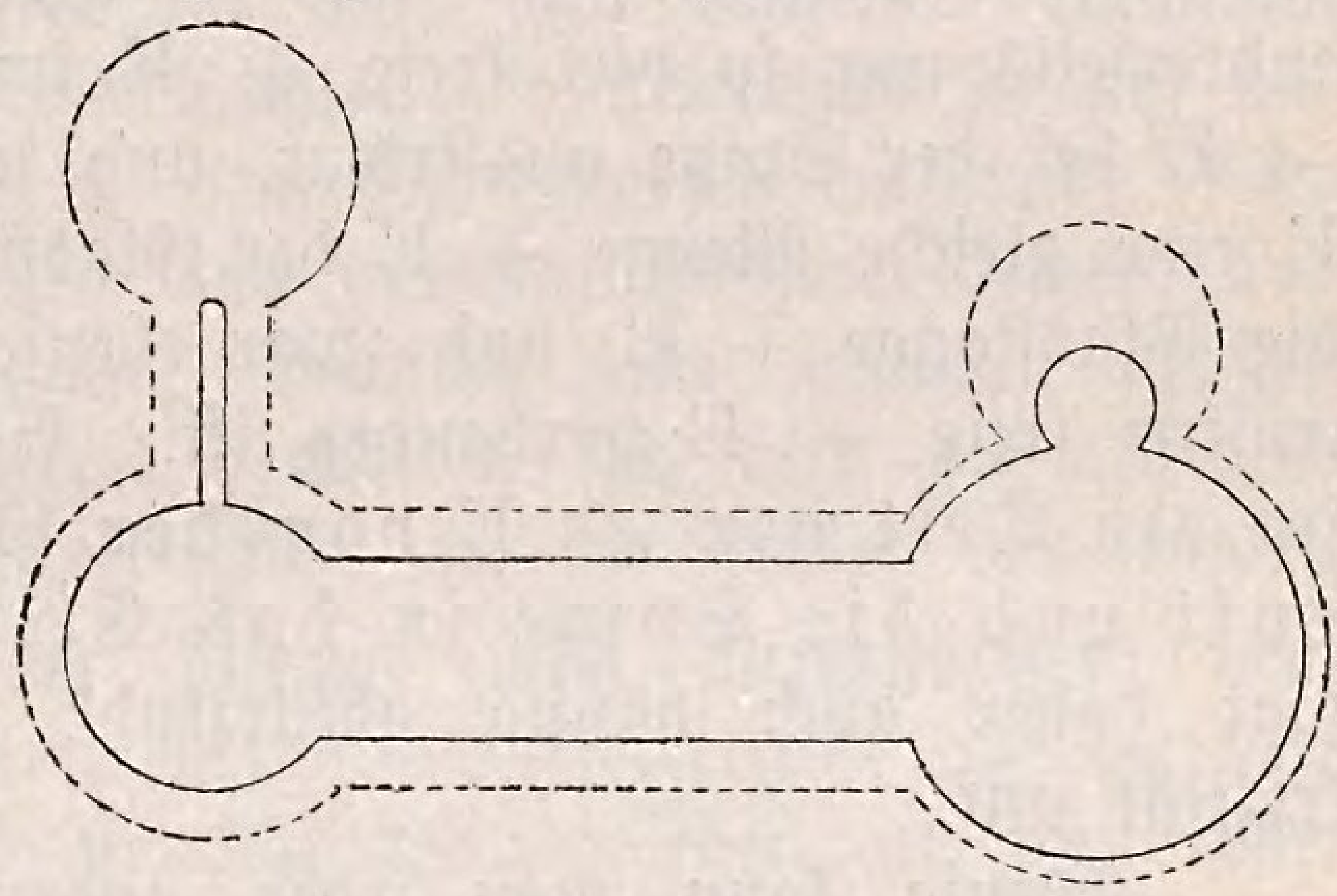
Die elektrische Anziehung wird nicht gehindert, wenn zwischen den beiden elektrischen Massen sich ein Nichtleiter befindet. Sie wird also nicht gehindert durch Luft, ebenso nicht durch Glas, Kautschuk u. s. w.,. sie durchdringt also gleichsam die Nichtleiter, weshalb man dieselben auch *dielektrische* Massen nennt. Dazwischenschieben von Leitern dagegen bringt eine wesentliche Veränderung in der

elektrischen Anziehung hervor, da die Leiter selbst elektrisch influenziert werden und mit diesen elektrischen Mengen nun selbst anziehend wirken.

Gerade diese Fernewirkung der Elektrizität, sowie die Fähigkeit, hiebei manche Stoffe zu durchdringen, manche aber selbst elektrisch zu erregen, sind es, welche uns das Wesen der Elektrizität, sowie der elektrischen Anziehung rätselhaft erscheinen lassen.

95. Verteilung der Elektrizität auf einem Leiter. Wirkung der Spitze.

Wenn auf einem Leiter Elektrizität vorhanden ist, so verbreitet sie sich, da die einzelnen Teilmengen der Elektrizität sich gegenseitig abstoßen, über die ganze Oberfläche, aber nur auf einer Kugel ist sie dann gleich dicht oder gleichmäßig verteilt, d. h. so, daß auf jedem gleich großen Flächenstückchen gleich viel Elektrizität sitzt; auf jedem anderen Leiter ist sie ungleichmäßig verteilt und zwar so, daß an den stärker gekrümmten Stellen die Elektrizität dichter ist; je stärker also eine Stelle der Oberfläche gekrümmt ist, um so mehr Elektrizität sitzt auf derselben. (Elektrisches Verteilungsgesetz). Die Figur 122 stellt einen isolierten Leiter vor, dessen Oberfläche verschiedene Krümmung besitzt. Die gestrichelte Linie soll durch ihren Abstand von der Oberfläche angeben, wie groß etwa die Dichte der Elektrizität an jeder Stelle ist.


Fig. 122.

Wenn auf einem Leiter eine Spitze angebracht ist, so ist, weil die Fläche an der Spitze ungemein stark gekrümmt ist, die Dichte der Elektrizität auf der Spitze sehr groß.

Mit der Dichte der Elektrizität wächst aber auch ihre Spannung, das ist die nach außen gerichtete abstoßende Kraft der gleichnamig elektrischen Teilchen; damit wächst auch das Bestreben und die Fähigkeit, von dem Leiter wegzugehen, die Luft zu durchbrechen und auf einen benachbarten Leiter überzuspringen. Da die Luft kein Leiter ist, so wird sie dabei unter einer Lichterscheinung, dem elektrischen Funken, durchbrochen. Nun ist aber auf einer Spitze die Dichte und damit auch die Spannung der Elektrizität sehr groß, deshalb zeigt sich, daß die auf einem Leiter befindliche Elektrizität durch eine Spitze sehr leicht ausströmt. Hiebei wird die Luft nicht durchbrochen, sondern die der Spitze zunächst liegenden Luftteilchen werden durch die Elektrizität der Spitze elektrisch geladen und zwar mit hoher Spannung, werden dann, als gleich-

namig elektrisch, von der Spitze abgestoßen und entführen so der Spitze die Elektrizität.

Bringt man auf dem Knopfe des Elektroskops eine Spitze an, und nähert ihr die elektrische Glasstange, so wird das Elektroskop influenziert, an den Blättchen +, an der Spitze —; diese — Elektrizität strömt durch die Spitze leicht aus, geht durch die Luft zur Glasstange und neutralisiert sich mit der dort befindlichen + Elektrizität; die Elektrizität der Blättchen bleibt im Elektroskope; dasselbe ist also positiv geladen: **Ein Elektroskop kann gleichnamig geladen werden durch Influenz und Ausströmen der Influenzelektrizität erster Art durch eine Spitze.** Da einerseits die influenzierten Mengen + und — Elektrizität einander gleich sind, andrerseits nur so viel freie + E im Elektroskop zurückbleibt, als — E bei der Spitze ausströmt, und schließlich die ausströmende — E eine gleiche Menge + E der Glasstange neutralisiert, so verliert die Glasstange + E, und zwar ebensoviel, als schließlich im Elektroskop freie + E vorhanden ist. Es schaut also so aus, als sei ein Teil der + E von der Glasstange weg durch die Luft und die Spitze in das Elektroskop gegangen; man sagt daher auch häufig abkürzend: **die Spitze saugt die Elektrizität auf.**

Ebenso kann man jeden andern isolierten Leiter elektrisch machen, wenn man auf ihm eine Spitze anbringt und dieser einen elektrischen Körper nähert.

Umgekehrt, wenn man einem isolierten Leiter, der eine Spitze besitzt, Elektrizität mitteilt, so strömt fast alle mitgeteilte Elektrizität durch die Spitze aus, nur ein kleiner Rest bleibt auf dem Leiter, so daß die Elektrizität auf ihm nur eine geringe Spannung bekommen kann. An einem isolierten Leiter, dem man größere Mengen Elektrizität mitteilen will, müssen demnach Spitzen, scharfe Ecken und Kanten sorgfältig vermieden werden; er muß möglichst schwach gekrümmte, glatte Flächen haben.

Von Wichtigkeit sind noch folgende Sätze:

Der Sitz der Elektrizität auf einem isolierten Leiter ist die äußere Oberfläche desselben; im innern eines geschlossenen oder nur nahezu geschlossenen, hohlen Leiters gibt es keine freie Elektrizität. Nachweis mittels eines biegsamen Drahtnetzes.

Bei gleichbleibender Ladung nimmt die elektrische Dichte eines Körpers in dem Maße ab, als seine Oberfläche vergrößert wird. Nachweis durch Aufrollen eines Drahtnetzes, sowie durch Seifenblase.

Ein elektrischer Leiter, welcher in das Innere eines metallischen Hohlkörpers gebracht wird, gibt bei Berührung mit der Innenwand seine ganze Ladung an die umschließende Metallhülle ab.

Ist die Elektrizität auf einem Leiter nach dem Flächengesetz in verschiedener Dichte verteilt, so hat sie doch auf der ganzen Ober-

fläche denselben Zustandsgrad, denn ein Elektroskop gibt, mit beliebigen Punkten der Oberfläche leitend verbunden, stets denselben Ausschlag. Dieser Zustandsgrad heißt das **Potenzial** der Elektrizität. **Die Elektrizität hat auf der ganzen Oberfläche des Leiters dasselbe Potenzial.**

Das Potenzial wächst auf ein und demselben Leiter entsprechend der Dichte. Gibt man dem Leiter eine doppelte Ladung so zeigt er einen entsprechend größeren Ausschlag am Elektroskop; er hat doppeltes Potenzial.

Wenn man drei isolierte aber mit einander leitend verbundene Hohlkugeln gemeinsam ladet, so haben sie dasselbe Potenzial, denn sowohl verbunden, als auch jede für sich, gibt denselben Ausschlag am Elektroskop. Prüft man die Dichten, so verhalten sie sich umgekehrt wie die Radien, wie es dem Flächengesetz entspricht. Die zweimal größere Kugel hat also eine zweimal kleinere Dichte, aber eine viermal größere Oberfläche, demnach eine zweimal größere Ladung. Bei gleichem Potenzial verhalten sich also die auf zwei Kugeln befindlichen Mengen Elektrizität wie die Radien der Kugeln.

Die Elektrizität ist der Menge nach unzerstörbar; denn wenn man die auf einem Leiter befindliche Elektrizität auf beliebige andere Leiter verbreitet, und sie schließlich wieder auf dem ersten Leiter ansammelt, so hat sie wieder dieselben Eigenschaften wie zuerst; ist also der Menge nach unverändert geblieben. Daß die Elektrizität, wenn man sie auf einen ungemein großen Körper verbreitet, also etwa zur Erde ableitet, für unsere Wahrnehmung verschwunden ist, spricht nicht gegen ihre Unzerstörbarkeit.

Wegen dieser Unzerstörbarkeit kann man die Elektrizität wie eine Masse betrachten, welche sich von den gewöhnlichen Massen jedoch dadurch unterscheidet, daß sie, mit einer gleich großen Menge entgegengesetzter Elektrizität zusammengebracht, verschwindet.

Bringt man gleiche Mengen Elektrizität auf Leiter von verschiedener Form und Größe, so zeigt sie am Elektroskop verschiedenen Ausschlag, also verschiedenen Zustandsgrad, verschiedenes Potenzial. Man sagt, diese Leiter haben verschiedene **Kapazität.** Man sagt, ein Leiter hat die zweifache Kapazität, wenn man auf ihn zweimal so viel Elektrizität bringen muß, damit er dasselbe Potenzial hat.

Die **Kapazität** wird gemessen durch die **Menge** Elektrizität, welche man einem Leiter geben muß, damit er ein bestimmtes Potenzial erreicht.

Soll Elektrizität auf einen Leiter gebracht werden, so daß er ein bestimmtes Potenzial erhält, so ist dazu eine gewisse Arbeit erforderlich, und umgekehrt: Fließt Elektrizität von einen Leiter zur Erde ab, so leistet sie dabei eine gewisse Arbeit. Das **Potenzial** einer Ladung kann gemessen werden durch die **Arbeit**, welche eine

gewisse Menge Elektrizität, die auf einem Leiter von bestimmter Kapazität ist, beim Abfließen leistet.

96. Elektrisiermaschine.

Auf der Wirkung der Spitzen beruht auch die Elektrisiermaschine. Sie besteht aus dem Reibzeug, dem Auffaugeapparat und dem Konduktor. Das Reibzeug besteht 1. aus einer großen, dicken, gut polierten Glasscheibe, die durch eine Kurbel gedreht werden kann, 2. aus zwei Reibkissen, die mit Seide oder Leder überzogen und dann noch mit Amalgam bestrichen sind. Sie sind zu beiden Seiten der Glasscheibe angebracht und durch Federn an dieselbe gedrückt, so daß die Glasscheibe beim Drehen sich an ihnen reibt und + elektrisch wird, während die Kissen — elektrisch werden. Zum Auffaugeapparat gehören zwei Holzringe, die zu beiden Seiten der Glasscheibe so aufgestellt sind, daß die elektrisch gewordene Scheibe zwischen ihnen durchgeht. An der der Glasscheibe zuge-

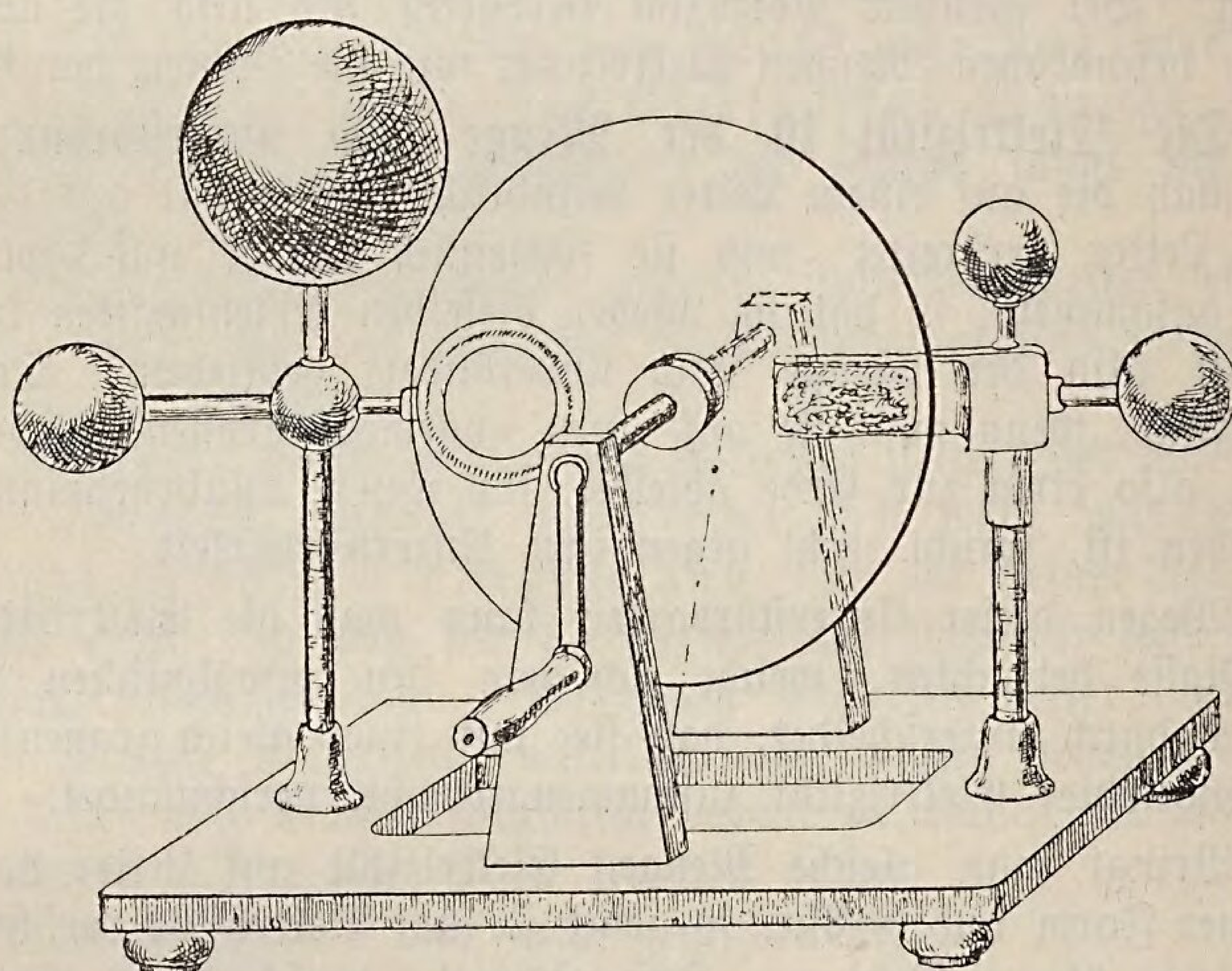


Fig. 123.

wendeten Seite sind in die Holzringe Messingstreifen eingelassen und auf diesen viele Spitzen so befestigt, daß sie der Glasscheibe zugewendet sind. Diese Spitzen oder Spitzenrechen bilden den Auffaugeapparat, welcher durch Messingarme mit dem Konduktor leitend verbunden ist. Der Konduktor, ein isolierter Leiter, ist gewöhnlich eine Messingkugel auf einem Glasfuß.

Wird die Glasscheibe gedreht, so wird sie positiv elektrisch, kommt so zwischen die Holzringe und influenziert die Spitzen —, den Konduktor +; die — E der Spitzen strömt aus, vereinigt sich mit der + E der Glasscheibe und neutralisiert sie; die + E

des Konduktors wird dadurch frei. Durch fortgesetztes Drehen strömt immer mehr — E aus den Spitzen aus, es wird also immer mehr + E auf dem Konduktor frei, sie bekommt eine immer größere Dichte und man sieht sie bald in Form langer Funken auf genäherte Leiter überspringen.

Als Erfinder der Elektrisiermaschine gilt Otto von Guericke. Seine Maschine bestand aus einer Schwefelkugel, die auf einer Achse befestigt war und so gedreht wurde; hielt man dabei die trockene Hand daran, so wurde sie elektrisch. Später wurde die Schwefelkugel durch Glaskugel und Glasscheibe, die Hand durch ein Reibzeug ersetzt und Konduktor und Spitzenrechen dazugefügt.

Man kann selbst durch fortgesetztes Drehen nicht beliebig viel Elektrizität auf den Konduktor ansammeln, also die Dichte derselben nicht beliebig hoch steigern. Denn auch bei direkter Berührung der Spitzen könnte das Potenzial des Kondukteurs nicht größer sein als das der Scheibe. Die Dichte der Elektrizität auf dem Konduktor wächst also nur so lange bis ihr Potenzial gleich dem der Scheibe geworden ist. Daraus folgt auch, daß ein Konduktor um so stärker geladen wird, je stärker die Elektrizität auf der Glastafel, je besser also das Reibzeug ist, und je besser die Spitzen wirken.

Da beim Reiben zweier Körper stets gleiche Mengen entgegengesetzter Elektrizität erzeugt werden, so kommt auch auf den Reibkissen — E in großer Menge zum Vorschein; man kann auch diese ansammeln, indem man die Reibkissen durch einen Glasfuß isoliert, und an ihnen einen Konduktor anbringt. Gewöhnlich benützt man aber nur die + E und leitet dann die — E der Reibkissen durch ein Kettchen zur Erde (an die Gasleitung) ab, da sie sonst das Entstehen neuer + E beim Reiben verhindern würde.

97. Versuche mit der Elektrisiermaschine.

Wenn man dem geladenen Konduktor einen Leiter nähert, dessen anderes Ende abgeleitet, d. h. mit der Erde leitend verbunden ist, so sieht man einen glänzenden Funken vom Konduktor zum Leiter überspringen und hört einen Knall. Auf dem genäherten Teile des Leiters ist nämlich entgegengesetzte Elektrizität influenziert, diese und die Elektrizität des Konduktors ziehen sich an, und wenn ihre Spannung groß genug ist, verlassen sie ihre Leiter, durchbrechen die Luft, vereinigen sich und heben sich auf. Man kann nicht gerade behaupten, daß immer vom Konduktor + E hiebei zuerst hervorspringe, noch daß sie von beiden Leitern zugleich wegspringe, kann auch im allgemeinen nicht angeben, an welchem Punkte sie sich vereinigen. Die Lichterscheinung entsteht aber nicht etwa da, oder bloß da, wo die beiden Elektrizitäten zusammentreffen, sondern auf dem ganzen Wege, den die Elektrizitäten durchlaufen, und

der Ausgleichspunkt ist durch keinerlei besondere Wirkung ausgezeichnet. Der Weg des Funkens ist vielfach gezackt, weil die Elektrizität die Luft nicht bloß durchbricht, sondern auch vor sich herschiebt, also verdichtet, und dann nicht mehr durch die verdichtete Luft weitergeht, sondern seitlich ausweicht. Der Funke teilt sich oft in zwei oder mehrere Zweige, die sich wieder vereinigen, oder es spalten sich von ihm kleine Verästelungen ab, die sich nicht mehr mit ihm vereinigen.

Beim elektrischen Funken werden von den Körpern Stoffteilchen weggerissen, welche sich verflüchtigen oder verbrennen.

Der Funke springt nie auf einen genäherten Nichtleiter, weil derselbe nicht, wenigstens nicht gut influenziert ist, also auf ihm keine entgegengesetzte anziehende Elektrizität vorhanden ist. Wohl aber springt ein Funke durch einen Nichtleiter, wenn er dünn genug ist (Blatt Papier) und hinter demselben ein Leiter sich befindet, welcher influenziert ist. Der Nichtleiter wird dabei durchbohrt.

Springt ein Funke auf einen isolierten Leiter über, so gleicht er sich mit dessen Influenzelektrizität 1. Art aus. Es wird also auf dem Leiter soviel Elektrizität frei, als den Konduktor verlassen hat. Durch diesen Ausgleich ist also die Menge der vorhandenen Elektrizität nicht verringert, sondern nur anders verteilt worden. Das Potenzial ist offenbar kleiner geworden.

Steckt man auf den Konduktor einen Draht und läßt von dessen oberem Ende mehrere schmale Streifen leichten Papiers herunterhängen und elektrisiert den Konduktor, so fliegen die Papierstreifen auseinander (wie die Stäbe eines aufgespannten Regenschirmes), weil sie elektrisch geworden sind, sich also gegenseitig abstoßen und auch vom Konduktor abgestoßen werden.

Befestigt man auf dem Konduktor eine Spitze, so strömt Elektrizität aus der Spitze aus, und es ist nicht möglich, den Konduktor stark zu laden. Dieses Ausströmen ist auch mit einer Lichterscheinung verbunden; es zeigt sich nämlich ein von der Spitze ausgehendes Büschel von schwach leuchtenden rötlichen und violetten Strahlen, wenn + E ausströmt, Büschellicht, dagegen ein kleiner heller Lichtpunkt ganz an der Spitze, wenn — E ausströmt; dieser Lichtpunkt ist umgeben mit einem sehr schwachen Lichtschein, der nach allen Seiten sich gleichmäßig ausbreitet (Glimmlicht). Das Ausströmen geschieht, wie früher erwähnt, dadurch, daß die nächstliegenden Luftteilchen, besonders Wasserdampf, von der Spitze elektrisch gemacht und dann abgestoßen werden; es entsteht also ein von der Sitze ausgehender Luftstrom, den man durch die Verdunstungskälte fühlt, wenn man den befeuchteten Finger davor hält. Die Spitze selbst erleidet einen Rückstoß, den man am elektrischen Flugrad wahrnehmen kann.

Der Funkenzieher, Figur 124, besteht aus einem langen Draht, welcher am oberen Ende zugespitzt, am unteren Ende mit einer Kugel versehen und durch einen Glasfuß isoliert ist. Unter der Kugel ist in kurzem Abstande eine zweite Kugel angebracht, die zur Erde abgeleitet ist. Nähert man diesen Apparat mit der Spitze dem Konduktor, während die Elektrisiermaschine in Thätigkeit ist, so erkennt man wieder die Wirkung der Spitze, indem von ihr negative Influenzelektrizität ausströmt und zum Konduktor übergeht; dadurch wird immer mehr + E auf der Kugel frei und diese springt in Funken auf die benachbarte, abgeleitete Kugel über.

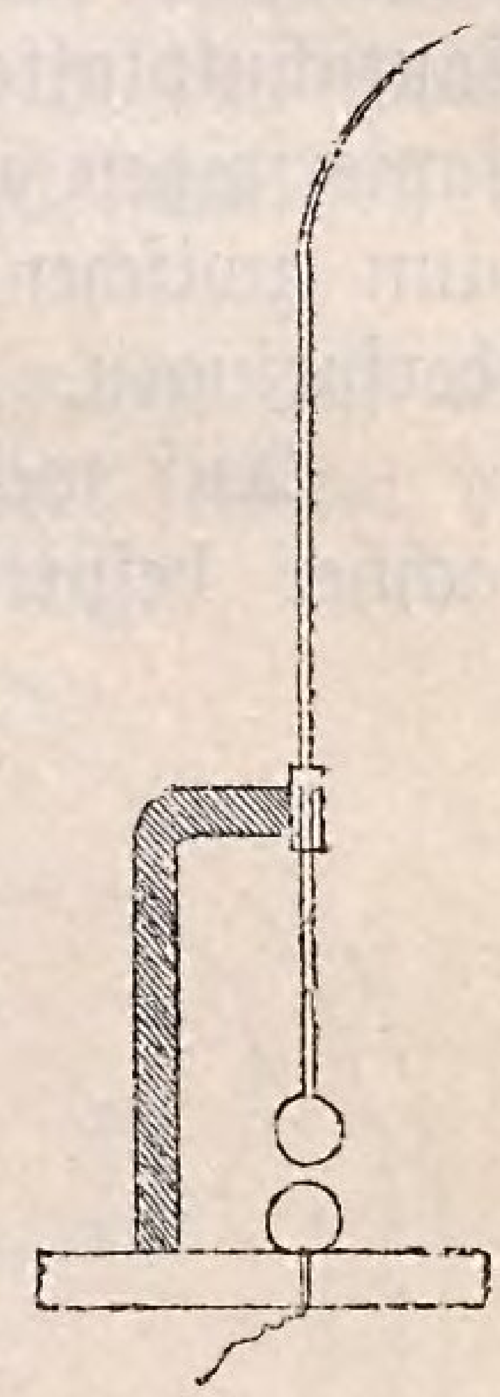


Fig. 124.

Ähnlich wie eine Spitze wirkt eine Flamme, denn die auf dem Leiter befindliche Elektrizität wird durch die Verbrennungsgase fortgeführt. Befestigt man ein Wachslicht auf dem Konduktor einer thätigen Elektrisiermaschine, so behält der Konduktor gar keine Elektrizität. Befestigt man das Wachslicht an der Spitze des Funkenziehers, so wirkt es wie die Spitze, sogar noch auf viel größere Entfernung. Ein in der Nähe der Elektrisiermaschine brennendes Gaslicht entzieht dem Konduktor alle Elektrizität, so daß jeder Versuch mißlingt, u. s. w.

98. Influenzmaschine.

Die Influenzmaschine (erfunden von Holz), auch Elektrophormaschine genannt, hat keinerlei Reibzeug, und hat ihren Namen davon, daß bei ihr, ähnlich wie beim Elektrophor, die Elektrizität durch Influenz hervorgebracht wird.

Zwei gut gefirnißte Glasscheiben sind parallel in geringem Abstand aufgestellt; die eine, kleinere, ist auf einer Achse befestigt und kann mittels Schnurlaufes und Kurbel rasch gedreht werden; die andere steht fest, hat in der Mitte einen runden Ausschnitt, um die erwähnte Achse durchzulassen, und rechts und links noch je einen Ausschnitt, außerdem hat sie rechts unterhalb und links oberhalb des Ausschnittes auf ihrer Rückseite ein Stück Papier aufgeklebt. Von jedem Papierbelege geht auf den Ausschnitt zu ein Papierstreifen, biegt sich nach vorn durch den Ausschnitt und berührt wohl auch mit seiner Spitze die drehbare Scheibe. Die drehbare Scheibe wird so gedreht, daß ihre Teile immer zuerst zum Ausschnitte und dann zum Papierbelege kommen; es wird also „gedreht gegen die Papierspitzen."

Vor der drehbaren Scheibe sind zwei Saugkämme angebracht, so daß sie den Papierbelegen gegenüberstehen. Von den Saugkämmen führen zwei Messingarme zu isolierten Polhaltern; durch diese führen zwei verschiebbare Messingstangen, die gegen einander

gerichtet sind und dort zwei Kugeln, die Pole, tragen; an den anderen Enden sind Kautschukhandgriffe angebracht.

Wirkung der Maschine. Nachdem man dem einen Papierbeleg Elektrizität mitgeteilt hat, etwa durch Annähern einer geriebenen Kautschukplatte, dreht man in der angegebenen Weise gegen die Papierspitzen und entfernt die Pole etwas von einander; man sieht dann zwischen denselben eine erstaunliche Menge elektrischer Funken überspringen.

Auf welche Weise die Maschine so „erregt" wird, werden wir nachher besprechen; jetzt betrachten wir den Vorgang, nachdem die

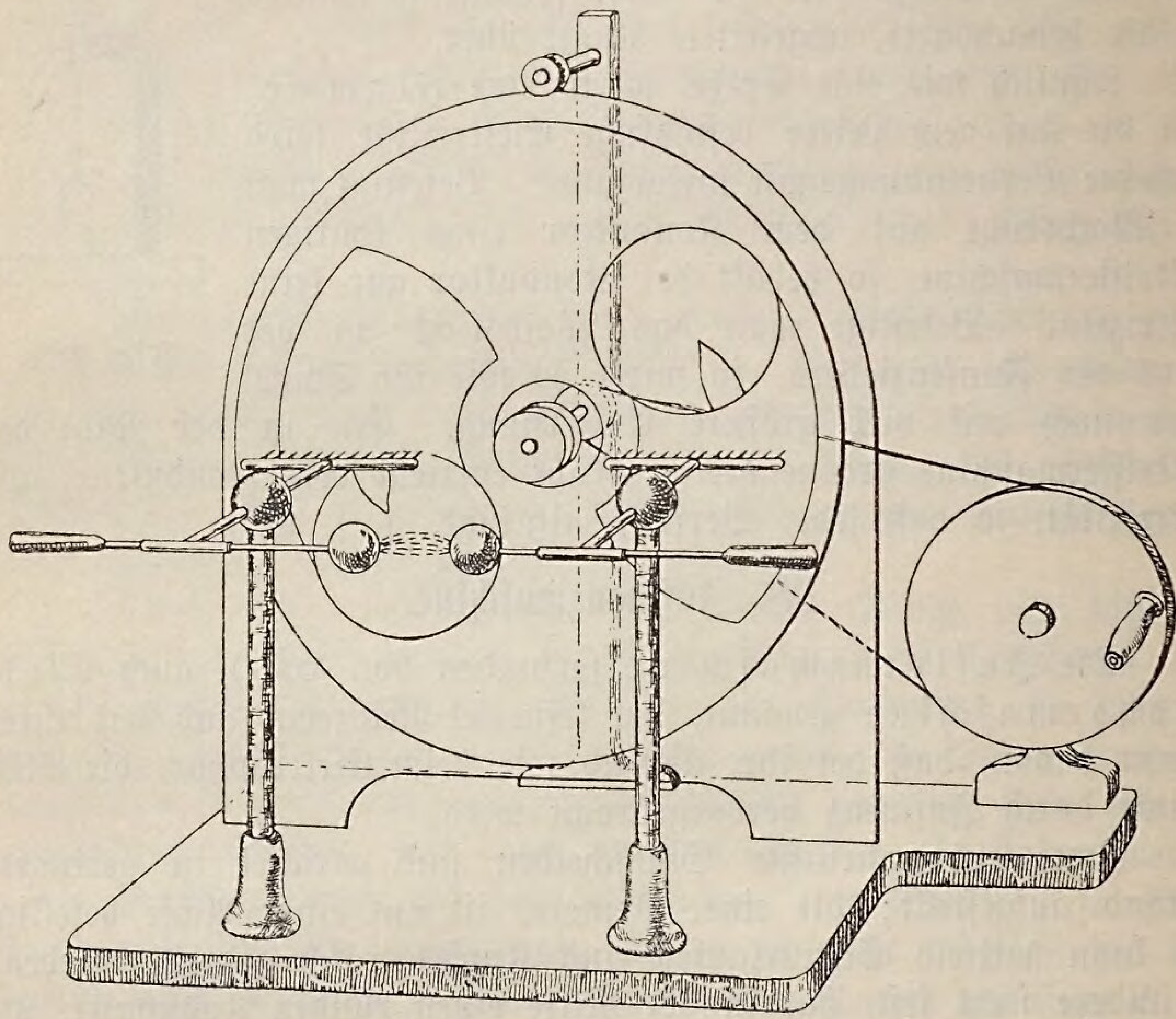


Fig. 125.

Maschine erregt ist. Die beiden Belege haben Elektrizität, der rechts liegende etwa —, der linke +. Der rechts liegende influenziert durch die sich drehende Scheibe hindurch den Saugkamm, an den Spitzen +, am Pol —, die + E der Spitzen strömt aus und kommt so auf die sich drehende Glasscheibe; es ist also die Glasscheibe dort, wo sie sich von dem Saugkamme rechts entfernt (also der Figur gemäß im untern Laufe vorn), + elektrisch. So kommt sie zum Papierbelege links, der + geladen ist, und auch zum Saugkamme. Sie selbst und der Papierbeleg influenzieren den Saugkamm, an den Spitzen —, am Pol +; es strömt die — E an den Spitzen aus auf die Scheibe, neutralisiert dort die + E und ladet sie noch mit

— E; es ist also die Scheibe dort, wo sie den Saugkamm links verläßt, (also im oberen Laufe) — elektrisch. So kommt sie wieder zwischen Papierbeleg und Saugkamm rechts, wodurch sich derselbe Vorgang wiederholt. Die Vorgänge sind wegen der Kontinuität der Drehung selbst kontinuierlich. Es tritt deshalb an den Polen beständig rechts — E, links + E auf, und diese gleichen sich in dem Funkenstrome aus.

Wir haben bisher auf die Wirkung der Papierspitzen und der Ausschnitte keine Rücksicht genommen, und in der That, wenn die elektrischen Ladungen in den Papierbelegen unverlierbar wären, so wären sie wohl überflüssig. Weil aber diese Ladungen nur zu leicht, besonders wenn sie stark sind, durch die Luft entweichen können, so muß dafür gesorgt werden, daß sie sich stets wieder ergänzen, ja sogar verstärken. Dies geschieht folgendermaßen.

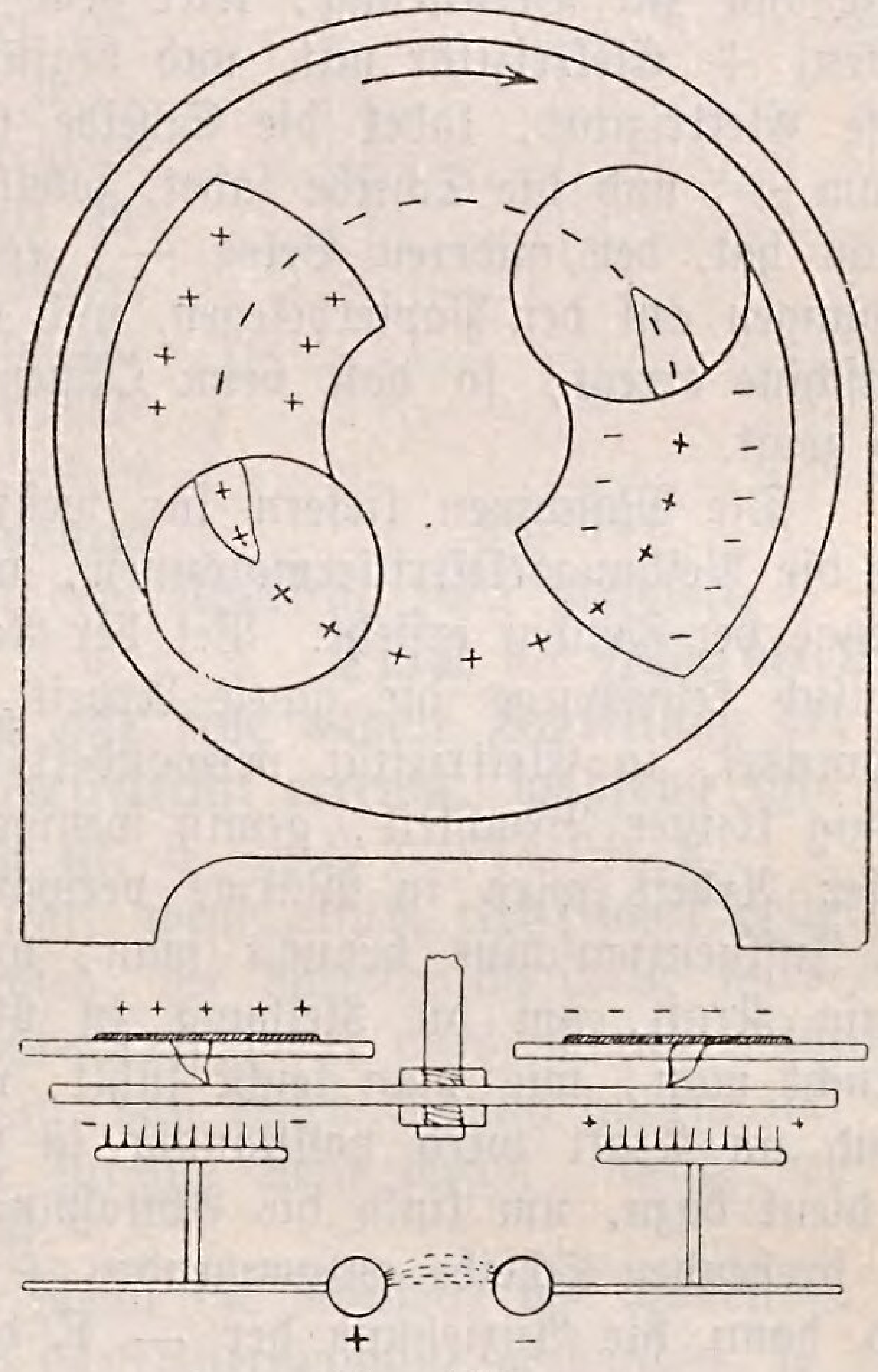


Fig. 126.

Die drehbare Scheibe ist in ihrem unteren Laufe + elektrisch und kommt so, bevor sie zwischen Saugkamm und Papierbeleg links kommt, an den Ausschnitt und die Papierspitze, die sie von hinten berührt. Die + E der Glasscheibe influenziert nun das Papier [Papier ist hiebei ein Leiter] und zwar an der Spitze — und auf dem Papierbelege +; so wird die + Ladung des Papierbeleges verstärkt. Die — E die Papierspitze strömt auf die Rückseite der sich drehenden Scheibe und bleibt dort, ist aber an Menge gering. Im oberen Laufe hat die drehbare Scheibe vorn — E und nun auch hinten — E (wenig). So kommt sie an den Ausschnitt rechts, influenziert den berührenden Papierstreifen an der Spitze +, und am Papierbeleg —; dadurch wird einerseits die — Ladung des Papierbeleges ergänzt und verstärkt, andrerseits strömt aus dem Papierstreifen + E auf die Rückseite der drehenden Scheibe, neutralisiert die dort befindliche (geringe) — E und erteilt ihr noch etwas + E. So geht es fort.

Der Vorgang auf der Rückseite der Scheibe ist also sehr nahe verwandt mit dem auf der Vorderseite. Tritt jedoch viel schwächer auf, weil er blos dazu dient, die Verluste der Papierbelege an die Luft zu ersetzen, und von selbst ganz aufhört, wenn diese Verluste gar nicht stattfinden; dieser Vorgang schwächt die Wirkung des Vorganges bei den Saugkämmen; deshalb ist in feuchter Luft, wenn die Verluste sehr groß sind, der Vorgang an den Saugkämmen schwach, also der Funkenstrom an den Polen gering.

Die Erregung geschieht auf folgende Weise: Man schließt die Pole bis zur Berührung, teilt dem einen Papierbeleg (etwa dem linken) + Elektrizität mit, und beginnt zu drehen, so wirkt sofort diese Elektrizität, ladet die Scheibe vorn —, den anderen Saugkamm +, und die Scheibe ladet, sobald sie eine halbe Drehung gemacht hat, den anderen Beleg —; es beginnt die Verstärkung der Ladungen auf den Papierbelegen, und nach wenig Drehungen ist die Maschine erregt, so daß beim Öffnen der Pole der Funkenstrom sich zeigt.

Die Maschinen liefern für weniger Arbeit mehr Elektrizität als die Reibungselektrisiermaschinen, wie man schon an der großen Menge der Funken ersieht. Bei der Reibungselektrisiermaschine wird nämlich keineswegs die ganze Arbeit, welche man beim Umdrehen aufwendet, in Elektrizität verwandelt, sondern nur ein verhältnismäßig kleiner Bruchteil, gewiß weniger als $1/_{10}$; der größte Teil dieser Arbeit wird in Wärme verwandelt (Reibungswärme). Bei der Influenzmaschine braucht man, wenn sie nicht erregt ist, nur wenig Kraft, um die Reibung zu überwinden; ist sie erregt, so braucht man, wie man leicht fühlt, mehr Kraft; dieser Mehraufwand an Kraft wird vollständig in Elektrizität verwandelt; denn er dient dazu, um links die Abstoßung der auf der unteren Hälfte der drehenden Scheibe ankommenden + E und der + E des Beleges und dann die Anziehung der — E der oben fortgehenden Scheibe und der + E des Beleges zu überwinden (ähnlich rechts). Die Folge davon, daß diese anziehenden und abstoßenden Kräfte überwunden werden, ist eben das Freiwerden der Elektrizität, und es tritt hiebei nur ein kleiner Verlust ein, um die Ladung der Belege zu ergänzen.

99. Elektrische Kondensation.

Wenn man einen isolierten Leiter mit dem Konduktor der Elektrisiermaschine verbindet, so kann dieser, ebenso wie der Konduktor selbst, nur bis zu einem gewissen Grade mit Elektrizität geladen werden. Je nach Größe und Form des Leiters befindet sich dann auf ihm eine gewisse Menge Elektrizität. Man kann aber doch auf dem isolirten Leiter noch größere Mengen Elektrizität ansammeln, also gleichsam die Elektrizität verdichten oder kondensieren auf folgende Weise: Der mit dem Kon=

duktor verbundene Leiter sei eine Metallplatte (A), sie heißt Kollektorplatte; dieser parallel stellt man in mäßigem Abstande eine zweite Metallplatte (B) auf, sie heißt die Kondensatorplatte. **Ohne Anwesenheit der Kondensatorplatte kommt auf die Kollektorplatte eine gewisse Menge Elektrizität,** die dem Potenzial auf dem Konduktor entspricht; ihre Menge sei etwa ausgedrückt durch + 16, + 8 auf jeder Seite.

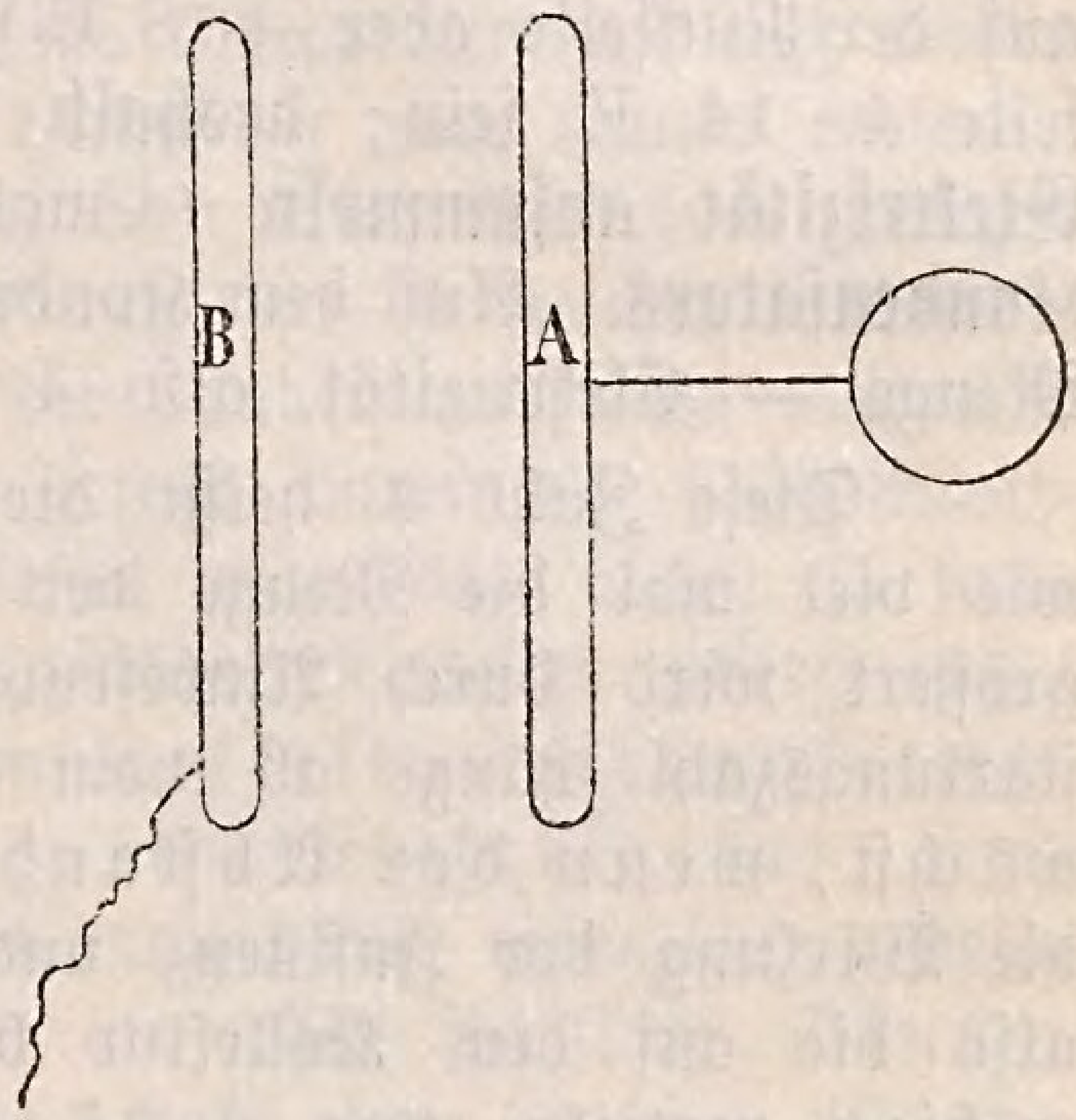


Fig. 127.

Wird der Kondensator genähert, so wird er influenziert, und zwar vorn, d. i. auf der zugewendeten Seite —, hinten, d. i. auf der abgewandten +; die letztere leiten wir zur Erde ab, weil sie die Wirkung der — E stören würde. **Die Elektrizität des Kollektors influenziert rückwärtswirkend den Kollektor,** und zwar vorn +, hinten —, beidesmal etwa 6; dadurch wird die + Elektrizität auf dem Kollektor vorn verstärkt, 8 + 6 = 14, hinten geschwächt 8 — 6 = 2. **Durch die Nähe der Kondensatorplatte wird zunächst nur eine andere Verteilung der auf dem Kollektor befindlichen Elektrizität erreicht, während ihre Gesamtmenge dieselbe geblieben ist,** 8 + 8 = 14 + 2.

Ähnliches findet stets statt, wenn einem elektrischen Leiter ein unelektrischer Leiter genähert wird; der unelektrische Leiter wird nicht nur elektrisch influenziert, sondern er wirkt durch Rückwärtsinfluenz so auf den geladenen Leiter ein, daß dessen Ladung anders auf ihm verteilt wird, und sich mehr auf die Seite begibt, welche dem genäherten Leiter zugewendet ist.

Wird nun aber oder bleibt die Rückseite des Kollektors mit dem Konduktor einer thätigen Elektrisiermaschine verbunden, so entspricht nun die auf der Rückseite befindliche Menge + 2 nicht mehr dem Potenzial der Elektrizität auf dem Konduktor, sondern ist viel zu klein; **es kann jetzt vom Konduktor neue Elektrizität auf den Kollektor herüberströmen.** Nehmen wir an, es fließen wieder + 16 E herüber; diese wirken nun sofort wieder auf den Kondensator influenzierend und werden von demselben rückwärts influenziert, so daß dieselben sich auch nicht gleichmäßig auf den Kollektor verteilen, sondern aus denselben Gründen so, daß auf die Vorderseite 14 E, auf die Rückseite 2 E hinkommen; es sind nun auf der Rückseite des Kollektors + 4 E. Da deren Menge noch nicht dem Pontenzial des Konduktors entspricht, so kann noch weitere Elektrizität vom Konduktor zum Kollektor gehen; **jede neu herüberkommende Menge wird wie-**

der ebenso verteilt wie die schon vorhandene. So kommt es, daß noch mehrmals 16 E herüberströmen können, nämlich so lange, bis auf der Rückseite des Kollektors wieder + 8 ist, wie es dem Potenzial des Konduktors entspricht. Da nun, so oft auf der Rückseite des Kollektors + 2 E, ist auf der Vorderseite + 14 E ist, auf der Rückseite aber + 8 E sein können, so können auf der Vorderseite 4 · 14 E sein; **deshalb kann sich auf dem Kollektor mehr Elektrizität ansammeln** (4 mal mehr) **als ohne Anwesenheit des Kondensators.** Auf dem Kondensator ist natürlich eine entsprechende Menge — Elektrizität, also 4 · 13 E.

Diese Zahl 4 heißt die Verstärkungszahl, sie gibt an, wie viel mal die Menge der Elektrizität auf dem Kollektor vergrößert wird durch Anwesenheit des Kondensators. Diese Verstärkungszahl hängt ab vom Abstande der beiden Platten, und wächst, wenn der Abstand kleiner wird; denn dadurch wird die Wirkung der Influenz und Rückwärtsinfluenz größer; es wird also die auf dem Kollektor befindliche Elektrizität noch ungleichmäßiger verteilt, etwa + 15, und + 1; jede nun weiter herüberkommende Elektrizitätsmenge + 16 E wird nun wieder ebenso verteilt, liefert also für die Rückseite nur 1 E, so daß noch 7 mal je 16 E herüberkommen dürfen, bis die Rückseite 1 + 7 · 1 = 8 E hat, was der Spannung auf dem Konduktor entspricht; es sind dann auf dem Kollektor 16 + 7 · 16 = 8 · 16 E enthalten, die Verstärkungszahl ist 8; **die Verstärkungszahl wächst mit der Annäherung der Platten.**

Es ist jedoch für die durch Influenz zu erzeugende Elektrizitätsmenge nicht nur der Abstand des influenzierenden Körpers, sondern — aus einem uns noch ganz unbekannten Grunde — in hohem Grade die Natur des umgebenden dielektrischen Stoffes maßgebend (Faraday).

Ist statt Luft ein anderes Dielektrikum vorhanden, so wird die Verstärkungszahl und damit die Menge der angesammelten Elektrizität größer: bei Schwefel 3,84, Ebonit 3,15, Glas 3,01—3,24, Vakuum 0,999, Wasserstoff 0,995, Kohlensäure 1,0003.

Bringt man aber die beiden Platten einander einigermaßen nahe, so wächst infolge der Elektrizitätsansammlung die Spannung bald so stark, daß beide Elektrizitäten in Form eines Funkens sich ausgleichen und so die beabsichtigte Ansammlung vereiteln. **Um den Ausgleich zu verhindern, bringt man zwischen beide Platten einen starren Nichtleiter,** also etwa eine Ebonitplatte oder eine Glasplatte. Da der Nichtleiter die Influenz und Rückwärtsinfluenz nicht stört, den Ausgleich der angesammelten elektrischen Massen aber verhindert, so kann man die beiden Platten einander sehr stark nähern, also auch sehr viel Elektrizität auf ihnen

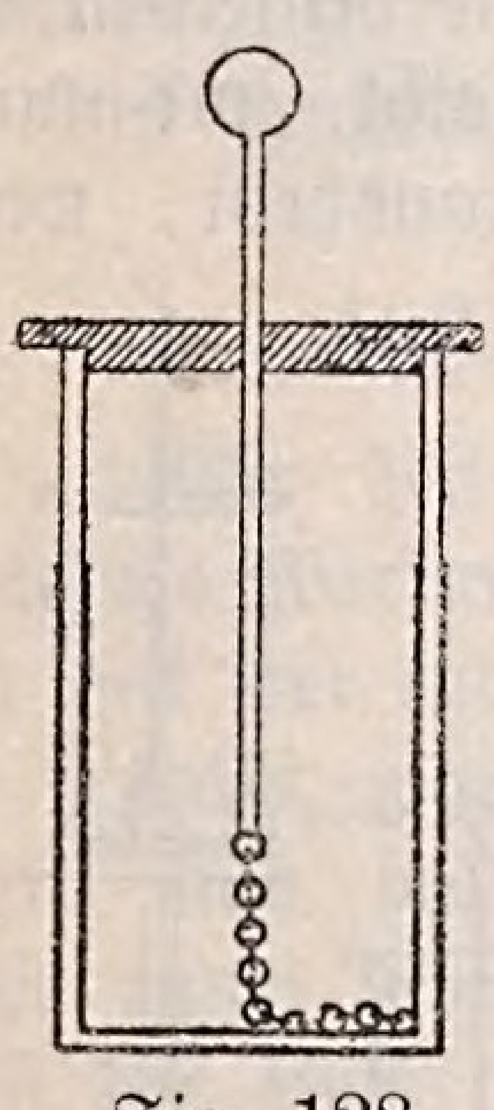
ansammeln, ohne daß dieselbe das Glas zu durchbrechen im stande wäre.

100. Die Franklin'sche Tafel.

Die einfachste Art einer elektrischen Kondensationsvorrichtung ist die Franklin'sche Tafel. Sie ist eine Glasplatte, die auf beiden Seiten mit Stanniol beklebt ist bis einige *cm* vom Rande entfernt. Setzt man die eine Stanniolplatte mit dem Konduktor einer thätigen Elektrisiermaschine in leitende Verbindung, so ist sie die Kollektorplatte, die andere Stanniolplatte ist die Kondensatorplatte und wird mit der Erde in leitende Verbindung gesetzt, damit die + Influenzelektrizität 2. Art abfließen kann (thut man das nicht, so kann man sie in Funkenform auf einen genäherten Leiter überspringen sehen). Es sammelt sich auf dem Kollektor viel positive, auf dem Kondensator viel negative Elektrizität, und die Tafel ist geladen. Verbindet man durch einen Leiter beide Platten, so springt ein Funke über, an dessen starkem Glanze und lautem Knalle man erkennt, daß eine große Menge Elektrizität ihn verursacht hat.

101. Die Leydener Flasche.

Die Leydener Flasche oder Kleist'sche Flasche besteht aus einem Becherglas, das innen und außen bis einige *cm* vom Rande mit Stanniol beklebt ist; sie ist bedeckt mit einem Holzdeckel, durch welchen ein Metallstift gesteckt ist; dieser trägt oben eine Messingkugel, unten ein Messingkettchen, das bis auf den Boden reicht.


Fig. 128.

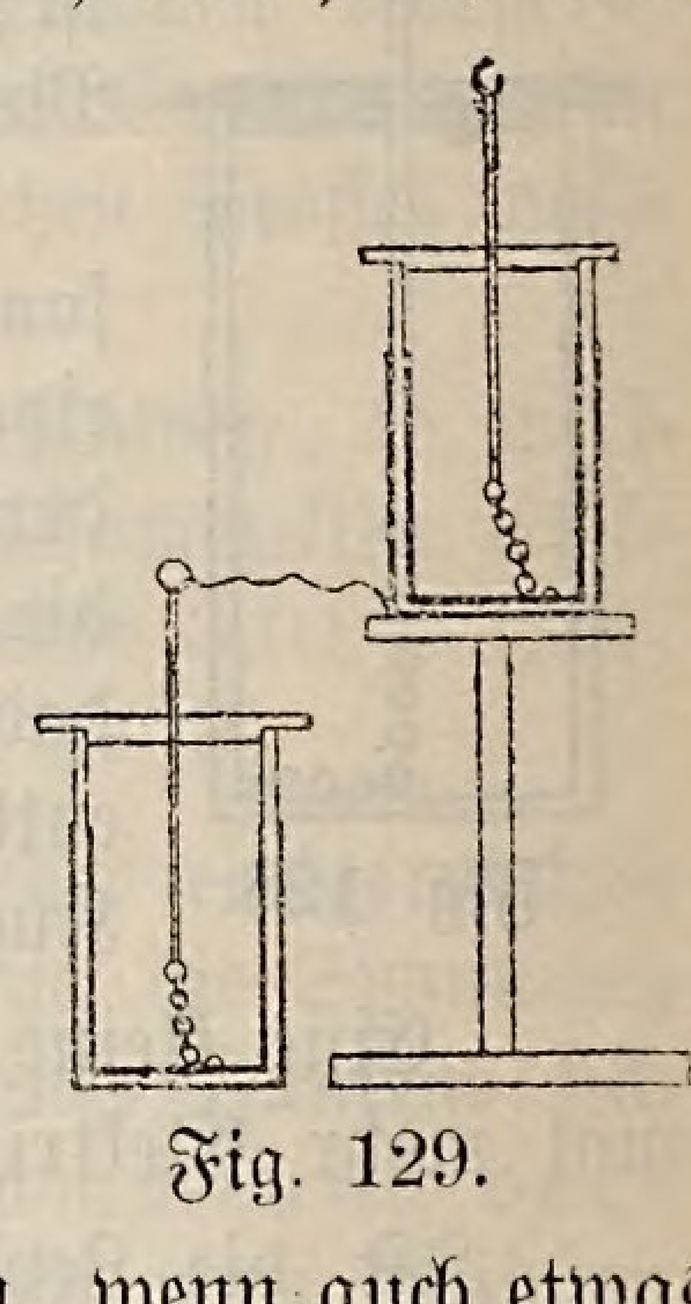
Sie wird geladen, indem man die Kugel und somit den inneren Stanniolbeleg mit dem Konduktor einer thätigen Elektrisiermaschine verbindet; dann ist der innere Beleg die Kollektorplatte, der äußere Beleg die Kondensatorplatte und meist hinreichend abgeleitet dadurch, daß man ihn auf den Tisch stellt. Sie wird entladen, indem man den äußeren Beleg mit der Kugel verbindet (Auslader).

Eine kleine Leydener Flasche faßt 30 mal, eine große 5—600 mal mehr Elektrizität als eine Kugel von 10 *cm* Radius.

Ist die Leydener Flasche geladen, so sagt man auch, die auf den beiden Belegen vorhandenen Elektrizitäten sind gebunden, das heißt sie ziehen sich gegenseitig an, so daß nicht eine ohne die andere fortfließen kann. Dies erkennt man an der — E des äußeren Beleges unmittelbar, ersieht es aber auch am innern Belege, wenn man die geladene Flasche auf einen

Isolierschemel (Schemel mit Glasfuß) stellt; berührt man nun den Knopf ableitend, so fließt keine, oder richtiger nur sehr wenig Elektrizität ab (schwacher Funke). Denn die — E des äußeren Beleges ist, da sie Influenzelektrizität ist, an sich schon an Menge geringer als die influenzierende + E des inneren Beleges; leite ich also den inneren Beleg zur Erde ab, so fließt dieser Ueberschuß ab, sogar noch etwas mehr; denn jetzt wirkt die — E influenzierend auf den inneren Beleg, und kann nur eine Menge influenzierend anziehen, die kleiner ist als sie selbst; es läuft also so viel von der + E des inneren Beleges fort, daß der zurückbleibende Rest gerade noch durch die anziehende Kraft der — E gehalten oder gebunden werden kann. Nun hat der äußere Beleg Ueberschuß, den ich ableiten kann, dann wieder der innere, kurz, man kann so eine Leydener Flasche auch ruckweise entladen. Ist die Leydener Flasche isoliert aufgestellt, so kann man sie auch durch den äußeren Beleg laden, indem man den äußeren Beleg mit dem Konduktor der Elektrisiermaschine verbindet, und den Knopf, also den inneren Beleg, zur Erde ableitet.

Stellt man eine Leydener Flasche isoliert auf, so kann man eine zweite laden durch die abgestoßene Influenzelektrizität 2. Art des äußeren Beleges der ersten Flasche; stellt man auch die 2. Flasche isoliert auf, so kann man von ihr aus eine 3. Flasche laden u. s. f., man nennt eine solche Anordnung eine Kaskadenbatterie (Franklin). Wenn man eine Leydener Flasche so konstruiert, daß man den innern Beleg herausnehmen kann, indem man denselben in Form eines ins Glas genau passenden Blechkörpers macht, und nun, nachdem die Flasche geladen ist, den Blechkörper heraushebt, was natürlich mittels eines Instrumentes geschehen muß, das einen isolierenden Handgriff hat, so zeigt sich der Blechkörper sehr wenig elektrisch. Die größte Menge Elektrizität ist auf der inneren Glasfläche sitzen geblieben, da sie von der äußeren — E angezogen wird und sich vom Blech, das ein guter Leiter ist, leicht trennt. Kann man auch den äußeren Beleg abheben, so zeigt sich auch dieser sehr wenig elektrisch; fast alle Elektrizität sitzt auf dem Glase. Entladet man die abgehobenen Belege und fügt sie wieder an das Glas, so zeigt sich die Flasche wieder geladen, wenn auch etwas schwächer als zuerst.


Fig. 129.

Wird eine Leydener Flasche entladen, so zeigt sie sich kurze Zeit nach der Entladung wieder geladen, jedoch schwach, sie gibt einen kleinen Funken und dann noch mehrere, immer schwächer werdende. Man nennt dies den elektrischen Rückstand.

102. Elektrische Batterie.

Will man noch größere Mengen Elektrizität ansammeln, so nimmt man mehrere Leydener Flaschen, verbindet die inneren Belege, indem man die Knöpfe verbindet, und die äußeren Belege, indem man sie auf eine gemeinschaftliche Stanniolunterlage stellt; **eine solche Zusammenstellung mehrerer Leydener Flaschen nennt man eine elektrische Batterie.**

Größere und kleinere Flaschen unterscheiden sich nicht bloß dadurch, daß in den größeren eine größere Menge Elektrizität angesammelt werden kann, sondern auch noch wesentlich durch die Spannung der Ladung. Ist nämlich bei beiden Flaschen das Glas gleich dick, so ist in beiden die Verstärkungszahl dieselbe; aber auf den kleineren Beleg setzt sich schon ohne Kondensation eine dichtere Elektrizität, entsprechend dem Flächengesetz, da eine kleinere Fläche wirkt wie eine Fläche von stärkerer Krümmung. Da also auf dem kleineren Belege die Dichte größer ist, in beiden Flaschen aber gleich vielmal vergrößert wird, so ist die Dichte und somit die Spannung der Elektrizität in der kleinen Flasche stärker als in der größeren Flasche. Der Entladungsfunke der kleineren Flasche ist demnach länger, bis mehrere *cm* lang, jedoch entsprechend der nicht beträchtlichen Gesamtmenge der Elektrizität nicht besonders glänzend; bei größeren Flaschen ist der Entladungsfunke wegen der geringen Spannung nur kurz, oft bloß 1 *cm*, dagegen wegen der bedeutenden Menge der Elektrizität sehr kraftvoll, stark knallend und stark glänzend, so daß er dem Auge als dick erscheint.

103. Wirkungen der elektrischen Entladung.

Mit den Leydener Flaschen oder Batterien untersucht man auch die Wirkung, welche die Elektrizität hervorbringt, wenn sie, um sich mit der entgegengesetzten auszugleichen, einen Körper durchdringt.

Läßt man mehrere kräftige Funken durch die Luft gehen, so spürt man bald einen eigentümlichen, stechenden Geruch; derselbe rührt wohl von dem Ozon her, das sich dabei aus dem Sauerstoff der Luft gebildet hat

Läßt man starke Funken durch dünne Drähte gehen, also große Massen Elektrizität durchfließen, so werden die Drähte warm, oft glühend, sogar geschmolzen, dünner Eisendraht zerstiebt bei kräftiger Entladung in ungemein viele Teilchen, die durch die Luft sprühend und mit hellem Glanze verbrennend, einen prächtigen Anblick bieten. Sogar Platin kann so geschmolzen werden. Man nimmt hiezu Batterien von großen Flaschen, die also große Mengen Elektrizität ansammeln. Ein Leiter wird durch den Durchgang der Elektrizität demnach meist gar nicht beschädigt, nur um so stärker

erwärmt, je dünner er ist. Wenn bei solchen Entladungen der Stoff, den die Elektrizität zu durchbrechen hat, nur geringen Widerstand bietet, so ist die Entladung eine plötzliche, fast momentane, und es tritt dann anstatt der Wärmeentwirkung vorwiegend eine mechanische Wirkung ein: der Draht wird geknickt, zerrissen, oder zerstiebt sogar. Schaltet man aber in den Weg der Elektrizität einen schlechten Leiter ein, z. B. ein Stückchen feuchte Schnur, so daß der Verlauf der sich ausgleichenden Elektrizität etwas langsamer stattfindet, so erfolgt nur Wärmewirkung.

Dies benützt man zum Entzünden der Minen. Soll etwa eine große Felsmasse losgesprengt werden, so wird sie unterminiert und Pulver in die Minenkammer gebracht; dann werden zwei durch Kautschuk isolierte Kupferdrähte zum Pulver geführt, an den Enden durch einen kurzen, dünnen Platindraht verbunden, und dieser Platindraht wird ins Pulver gesteckt. Die Drähte werden bis zu einem genügend weit entfernten Orte geleitet und dort zum Entladen einer starken Batterie benützt, im Augenblicke der Entladung wird die Mine durch den glühend werdenden Platindraht entzündet.

Läßt man den elektrischen Funken durch den menschlichen Körper gehen, indem man etwa mit der einen Hand den äußeren Beleg, mit der anderen den Knopf einer Leydener Flasche berührt, so fühlt man einen durch die Glieder zuckenden Schlag, der die Muskeln unwillkürlich zusammenzieht. Dieser Schlag wird schon schmerzhaft, wenn man die Flasche auch nur schwach geladen hat (3—4 maliges Umdrehen der Maschine). Stärkere Entladungen können für den menschlichen Körper gefährlich werden; sie führen vorübergehende oder bleibende Lähmung einzelner Gliedmassen oder größerer Körperteile, Taubheit, Lähmung der Sprache, ja sogar den Tod herbei. Läßt man einen elektrischen Funken durch das geschlossene Auge eindringen (natürlich wählt man einen sehr schwachen), so empfindet man eine Lichterscheinung.

Wesentlich anders verhält sich die Elektrizität beim Durchgange durch einen Nichtleiter. Da er die Elektrizität nicht leitet, so wird er durchbohrt, durchbrochen oder zertrümmert. Dies kann man bei starkem Papier und Glas sehen. Die Löcher im Papiere sind nicht wie mit einer Nadel gestochen, sondern haben auf beiden Seiten aufgeworfene Ränder, als wenn im Innern des Papieres eine Explosion stattgefunden und die Papiermasse beiderseits herausgeworfen hätte. Im Glase ist das Loch oft so fein, daß es nur mit dem Vergrößerungsglase gesehen werden kann. Pulver und Schießbaumwolle werden entzündet, ein lose hingelegtes Häufchen Pulver aber meist nur zerstreut. Holz wird durchbohrt, oft zersplittert, wohl auch entzündet. Auch hiebei wird Pulver stets nur zerstreut (zerrieben, zerstäubt), wenn der Entladungsweg aus

guten Leitern besteht, dagegen entzündet, wenn ein schlechter Leiter (feuchte Schnur) eingeschaltet ist.

104. Atmosphärische Elektrizität.

Die Luft in höheren Schichten (meistens von 300—400 *m* über dem Boden an) ist stets elektrisch; man nennt dies die atmosphärische Elektrizität. Ihre Spannung ist meist sehr gering, so daß es besonders empfindlicher und eigens eingerichteter Elektroskope bedarf, um sie nachzuweisen. Man leitet vom Knopfe des Elektroskopes einen Draht isoliert zu einer Stange, läßt ihn in einer feinen Spitze oder kleinen Flamme endigen und hebt nun mittels der Stange diese Spitze rasch nach aufwärts; so wird sie nun von der atmosphärischen Elektrizität, da sie derselben etwas näher gekommen ist, etwas stärker influenziert; die Influenzelektrizität erster Art strömt aus der Spitze aus, die Influenzelektrizität zweiter Art wird im Elektroskop frei.

Die atmosphärische Elektrizität ist meist positiv, jedoch vielen Schwankungen (auch ziemlich regelmäßigen, täglichen und jährlichen) unterworfen. Ihre Entstehung ist unbekannt.

105. Elektrizität der Gewitter.

Gewitter sind von großartigen elektrischen Erscheinungen begleitet. Die Gewitterwolke ist mit großen Massen Elektrizität von hoher Spannung geladen; dies wurde zuerst von Franklin nachgewiesen (1752). Beim Herannahen eines Gewitters ließ er einen Papierdrachen steigen, auf welchem eine nach aufwärts gerichtete Spitze angebracht war; das Ende der Schnur bestand aus Seide. Er bemerkte, wie die Fasern der Hanfschnur sich sträubten (weil sie elektrisch geworden waren) und sah, als die Schnur durch den Regen naß und dadurch gut leitend geworden war, Funken aus einem an der Hanfschnur hängenden Schlüssel herausspringen. Drache, Spitze und Hanfschnur stellen einen genäherten isolierten Leiter vor, aus der Spitze strömt die Influenzelektrizität erster Art aus, und in der Schnur wird deshalb die Influenzelektrizität zweiter Art frei. Seit Franklin wurde dieser (sehr gefährliche) Versuch öfters und stets mit demselben Erfolge wiederholt. Art und Stärke der Elektrizität prüft man ungefährlich mit dem Elektroskope, das für atmosphärische Elektrizität dient. Man findet die Elektrizität meist positiv, sie wächst an Stärke, bis es blitzt, nimmt dann sprungweise ab, wird wohl auch negativ und wächst dann wieder. Ueber die Art der Entstehung und Ansammlung der Elektrizität in der Gewitterwolke weiß man nichts Sicheres.

106. Der Blitz.

Der Blitz ist der Entladungsfunke der in der Gewitterwolke vorhandenen Elektrizität. Man unterscheidet

dreierlei Arten von Blitzen, die Strahlen-, Flächen- und Kugelblitze. Die Strahlenblitze verlaufen entweder bloß in den Gewitterwolken, oder gehen auch zur Erde. Sie haben die bekannte gezackte Form, entstehen oft aus mehreren Teilen, spalten sich auch wieder, beschreiben, wenn sie zur Erde gehen, einen der Hauptrichtung nach geraden und in der Wolke einen vielfach gebrochenen Weg, der aber nicht wieder rückwärts führt.

Durch den in der Wolke verlaufenden Blitz verteilt sich die in einem Teile (Ballen) der ganzen Wolkenmasse entstehende und zu großer Spannung angewachsene Elektrizität auf die anderen Teile (Ballen) der ganzen Wolkenmasse. Durch den zur Erde gehenden Blitz gelangt die Elektrizität der Wolke zu der auf der Erdoberfläche influenzierten entgegengesetzten Elektrizität und gleicht sich mit derselben aus, während die Influenzelektrizität zweiter Art, die auf der entgegengesetzten Seite der Erde (bei den Antipoden) entsteht, schon wegen ihrer Verteilung auf eine sehr große Fläche als nicht mehr vorhanden angesehen werden darf.

Die Blitze in der Wolke haben oft eine sehr beträchtliche Länge (mehrere Kilometer); der einschlagende Blitz hat nur eine Länge von einigen hundert Metern (Abstand der Wolke vom Boden). Gleichwohl hat der in der Wolke verlaufende Blitz keine höhere Spannung der Elektrizität; er fährt von Ballen zu Ballen, durchdringt die Wolkenmassen, welche durch die Wasserteile einen, wenn auch schlechten Leiter bilden, setzt sich also aus mehreren Teilen zusammen und durchläuft so mittels derselben Spannung einen viel längeren Weg, als wenn er durch die Luft zur Erde geht.

Flächenblitze verlaufen nur in den Wolken; man beobachtet sie am leichtesten, wenn das Gewitter über uns steht; man sieht dann einen Teil, eine Fläche der Wolken plötzlich in hellem, grellweißem Lichte aufleuchten, jedoch keinen Strahl. Näheres über ihre Entstehung und ihren Verlauf ist nicht bekannt, doch ist ihre Anzahl verhältnismäßig groß, oft größer als die der Strahlenblitze.

Kugelblitze sind eine sehr seltene Erscheinung. Es sind Strahlenblitze, die zur Erde gehen; wenn sie aber in die Nähe der Erde oder eines hohen Gegenstandes gekommen sind, gehen sie langsam, so daß man ihren Weg mit dem Auge verfolgen kann, erscheinen dann als eine glänzende Lichtkugel (Feuerkugel), laufen als solche sogar noch durch den Blitzableiter, einen Baum und ähnliches und verschwinden dann in der Erde. Das Wetterleuchten rührt von fernen Blitzen her und kann bis zu 400 bis 500 *km* Entfernung wahrgenommen werden, oft als Wiederschein an sehr hohen Wolken.

Eine ziemlich seltene Erscheinung ist auch das St. Elmsfeuer. Steht nämlich das Gewitter gerade über uns, so beobachtet

man manchmal Lichtbüschel, flackernde, zuckende, auch ziemlich ruhige Lichtstrahlen von gelblichem und rötlichem Lichte, die an hervorragenden spitzigen Gegenständen, Blitzableiterspitzen, Helm-, Lanzen-Masten- und Kirchturmspitzen, den emporgehaltenen Fingern, den Spitzen von Bäumen und Sträuchern zum Vorschein kommen. Es ist dies das elektrische Büschellicht (oder Glimmlicht), das dadurch entsteht, daß die Influenzelektrizität erster Art der Erde bei den Spitzen von Leitern ausströmt, durch die Luft zur Wolke geht und dort die entgegengesetzte Elektrizität neutralisiert. Es bewirkt so anstatt der raschen Entladung durch den Blitz eine langsame und ungefährliche Entladung durch Ausströmen.

107. Weg des Blitzes.

Der zur Erde gehende Blitz sucht ins Grundwasser zu kommen; denn hat er dies erreicht, so kann er durch dasselbe sich leicht mit der influenzierten entgegengesetzten Elektrizität ausgleichen und ist dann verschwunden. Beim Einschlagen bevorzugt er besonders folgende Gegenstände. 1. Größere Wassermassen, wie einen Fluß, Teich, See; denn da die Wassermasse ein guter Leiter ist, so wird sie besser influenziert als das benachbarte (trockene) Erdreich, und zieht deshalb die Elektrizität der Wolke an. Die Ufer größerer Wasserflächen sind deshalb fast frei von Blitzgefahr. 2. Größere Metallmassen, wie Metalldächer, eiserne Brücken, größere Lager von Eisenbahnschienen ꝛc. aus demselben Grund wie bei Wassermassen; doch ist es wohl eine thörichte Furcht, zu glauben, kleine Metallgegenstände, wie das Geld in der Tasche, ein Gewehr, ein Regenschirm mit Metallgestell, der Reif am Wagenrad ꝛc. ziehe den Blitz an. 3. Gegenstände, welche hoch über ihre Umgebung hervorragen; als solche sind besonders anzuführen: Kirchtürme, Schornsteine (die durch den Ruß im Innern dem Blitze noch dazu einen bequemen Weg bieten), die Masten der Schiffe, einzeln stehende Bäume oder solche (Samen-) Bäume, die hoch über die anderen (Jungholz) hervorragen, einzeln stehende Häuser, die Auffangstangen der Blitzableiter, ja schon ein Mensch auf freiem Felde. Solche hervorragende Gegenstände bevorzugt der Blitz deshalb, weil durch sie der Weg zum Grundwasser abgekürzt wird; anstatt nämlich diesen Weg ganz durch die Luft zu machen, wählt er lieber im unteren Teile seines Laufes den hohen Gegenstand, weil und soferne ihm derselbe weniger Widerstand bietet als die Luft. Ist der Gegenstand noch dazu ein guter Leiter, so wird er noch besonders vom Blitze bevorzugt, denn in manchen Fällen, in denen die Spannung der Gewitterelektrizität nicht, oder noch nicht stark genug ist, um die ganze Strecke durch die Luft bis zum Boden

zu durchbrechen, genügt die Spannung, um die kürzere Strecke durch die Luft bis zur Spitze des hohen Gegenstandes zu durchbrechen; das Aufstellen eines Blitzableiters erhöht also die Blitzgefahr etwas, und in diesem Sinne ist es richtig wenn man sagt, der Blitzableiter zieht den Blitz an. 4. Eine wesentliche Rolle spielt der Untergrund, auf dem der Gegenstand sich befindet; eine trockene, undurchlässige Schichte (Lehm, kompakter Felsen) schützt gegen Blitzschlag, da der Blitz, um zum Grundwasser zu gelangen, die schlecht leitende Erd- oder Felsschichte durchbrechen müßte; ist der Untergrund aber feucht, durchlässig, so stellt er eine leitende Verbindung mit dem Grundwasser her, und ist deshalb leicht der Gefahr des Blitzschlages ausgesetzt.

108. Blitzableiter.

Der Blitzableiter beseitigt die Gefahren des einschlagenden Blitzes, indem er den einschlagenden Blitz auffängt (Auffangstangen) und dann zur Erde ableitet (Ableitung). Die Auffangstangen sind (2—3 *m*) hohe, dicke, eiserne Stangen, die auf den höchsten Teilen des Hauses aufrecht befestigt werden. Da sie weit über die anderen Teile des Hauses hervorragen, so trifft der etwa einschlagende Blitz in sie und nicht in das Haus. Die auffangende Wirkung der Stange erstreckt sich aber nur über einen kleinen Umkreis, nämlich über einen Kreis, dessen Radius nur 2 mal größer ist als die Höhe der Stange. Ist ein Gebäude groß, so bringt man mehrere Auffangstangen an, so daß die Auffangkreise derselben die ganze Dachfläche sicher bedecken. Bei einem Turme kann es kommen, daß der durch die große Höhe des Turmes von seitwärts herbeigezogene Blitz nicht die Auffangstange, sondern einen tiefer gelegenen Teil des Turmes trifft; man läßt deshalb von der Auffangstange mehrere (4) Ableitungsstangen herabgehen und verbindet diese in mäßigen Abständen durch Metallringe, die um den Turm laufen, so daß der Turm gleichsam in ein Metallnetz eingehüllt ist (Straßburger Münster); der Blitz fährt dann sicher in einen Teil des Netzes und nicht durch die Maschen in den Turm.

Die Auffangstangen werden oben spitzig gemacht und zum Schutze gegen das Verrosten vergoldet oder mit Platinspitze versehen. Man hat den Zweck der Spitzen darin gesucht, daß durch sie viel ungleichnamige Influenz-Elektrizität gegen die Wolke ausströme und dadurch deren Elektrizität schwäche, und in der That zeigen sich große Städte, in welchen viele Blitzableiter angebracht sind, fast frei von Blitzgefahr; doch einerseits ist man nur selten im stande, ein solches Ausströmen durch ein Büschel- oder Glimmlicht wahrzunehmen, und andererseits mögen die viel zahlreicheren Schornsteine durch die Verbrennungsgase Elektrizität ausströmen

lassen und so die Schwächung der Gewitterelektrizität herbeiführen.*) Trifft ein Blitz in die Spitze, so kann wohl während des Herunterfahrens eine erhebliche Masse Elektrizität durch die Spitze dem Blitze entgegenströmen, dadurch seine Gewalt verringern und auf eine größere Zeit verteilen und darin liegt wohl ein Nutzen der Spitze.

Die Ableitung hat den Zweck, den durch die Auffangstange aufgenommenen Blitz zur Erde, oder, was auf dasselbe hinauskommt, die Influenzelektrizität der Erde ungefährlich zur Spitze zu leiten. Die Ableitungsstangen führen deshalb von den Auffangstangen ohne Unterbrechung bis tief in die Erde. Eiserne Auffangstangen müssen sehr dick sein, zusammenstoßende Enden müssen gut aneinander geschweißt sein; kupferne dürfen, da Kupfer ca. 6mal besser leitet als Eisen, viel dünner sein, und sind, da Kupfer nicht von Rost zerfressen wird, dauerhafter als Eisen. Da aber Kupfer etwas teuer ist, so macht man die Drähte, (am unrechten Orte sparend) oft etwas zu dünn. Die Ableitungsstangen werden auf kürzestem Wege zur Erde geführt, wobei scharfe Ecken vermieden werden; in die Erde werden sie so tief geführt, bis das Erdreich beständig feucht ist; dort läßt man sie in Kupferstreifen oder Platten endigen, die man mit Kohle umgibt; denn die Erdleitung soll mit dem Grundwasser in möglichst inniger, großflächiger, überhaupt möglichst widerstandsloser Verbindung sein. Von jeder Auffangstange soll wenigstens eine Ableitung direkt zur Erde gehen, außerdem werden alle Auffangstangen unter sich verbunden, da dann der Blitz sich auf alle Ableitungen verteilt. Große Metallmassen am Hause, wie Metalldächer, Dachrinnen, eiserne Gitter u. s. w. werden in die Ableitung eingeschaltet, indem man sie am oberen und unteren Ende mit der nächsten Stelle der Ableitung verbindet; der Blitz durchläuft dann auch diese Metallmassen, aber ungefährlich, da er aus dem unteren Ende wieder in die Leitung übergeht.

Ein guter Blitzableiter schützt das Gebäude vor den Gefahren des Blitzschlages; die Wahrscheinlichkeit, vom Blitz getroffen zu werden, wird durch den Blitzableiter wohl etwas erhöht, trifft aber der Blitz die Auffangstange, so wird er unschädlich in den Boden abgeleitet. Sehr gefährlich ist eine schlechte Ableitung, da leicht der Blitz von ihr abspringt und dann in das Haus fährt, oder einen Zweig in das Haus sendet. Dies tritt ein: wenn die Leitungsdrähte zu dünn sind, denn sie werden dann leicht geschmolzen, oder wenn zwei Drahtenden schlecht geschweißt oder gelötet sind, denn diese Stelle wird dann meist auch

*) „Die die Blitzgefahr verhütende Wirkung der Spitzen ist den großartigen Vorgängen in der Atmosphäre gegenüber so gering, daß sie fast vollständig verschwindet" (Academie française). „Die Wirkung der Spitzen erscheint in hohem Grade zweifelhaft" (Akademie in Berlin).

geschmolzen; oder wenn scharfe Ecken in der Leitung sind, denn sie wird an solchen Stellen zerrissen; oder wenn die Ableitung nahe an Metallmassen vorübergeht, die nicht in die Leitung eingeschaltet sind, denn es springt dann wohl ein Teil des Blitzes auf die Metallmasse und durch sie ins Haus; oder wenn die Ableitung nicht ganz ins feuchte Erdreich führt, denn der Blitz sucht sich dann auch einen vielleicht bequemeren Weg durch das Haus.

109. Wirkungen des Blitzes.

Wenn der Blitz in einen Gegenstand schlägt, so bringt er vielfach zerstörende Wirkungen hervor; nur wenn er direkt in Wasser fährt, verläuft er schadlos. Nichtleiter werden durchbohrt: Holz wird zersplittert, ein Baum zerspalten, die Rinde abgeschält, die Äste werden abgeschlagen und oft weit herumgeschleudert; Mauern werden zersprengt oder gespalten, Steine losgerissen, Mauerstücke verschoben oder umgeworfen. Durch Metallteile läuft er oft, ohne sie zu beschädigen, sogar ganz dünne Drähte, Klingelzüge, ja sogar die ganz dünnen Metallüberzüge vergoldeter Leisten werden oft vom Blitze durchlaufen, ohne daß er eine Spur hinterläßt; doch werden Metalle oft auch glühend gemacht, abgeschmolzen oder zersprengt; durch Glas geht er selten, weil er an den Fenstern meist Metallteile findet; doch werden dabei die Fensterscheiben oft durch den Luftdruck zersprengt. Häuser, Scheunen, Strohhaufen u. s. w. werden manchmal entzündet, doch sind die zündenden Blitze viel seltener als die nicht zündenden. Der Weg, den der Blitz in einem Gebäude nimmt, erscheint oft sehr unregelmäßig, und doch folgt der Blitz dabei dem Gesetze: *der Blitz nimmt stets den Weg, auf welchem die Summe aller von ihm zu überwindenden Widerstände am kleinsten ist*; er macht demgemäß oft scheinbar einen Umweg, wenn er dabei gute Leiter trifft, die nur durch geringere Lücken getrennt sind; trifft er in eine Telegraphenleitung, so läuft er meist nicht an der Stange herunter, sondern durchläuft eine wohl meilenlange Leitung, weil ihn diese mit geringerem Widerstande in den Boden führt. Trifft er in trockenen Sand (Lüneburger Heide, Sahara), so bilden sich sogenannte Blitzröhren, die Sandkörner werden geschmolzen und bilden dann eine Röhre, die innen ziemlich glatt ist, aber außen durch angeschmolzene Sandkörner rauh erscheint; manchmal gabelt sich eine solche Blitzröhre.*)

Sehr gefährlich wird der Blitz, wenn er durch den menschlichen (oder tierischen) Körper geht. Sehr oft ist plötzlicher, unmittelbarer Tod die Folge; oft aber betäubt er den Menschen nur

*) Die Blitzgefahr hat sich in Deutschland in den letzten 25—30 Jahren verdreifacht (Bezold); der jährliche Blitzschaden an Gebäuden beträgt jetzt 6—8 Millionen Mark.

vorübergehend oder durchfährt ihn unter Verursachung eines heftigen, zuckenden Schmerzes. Vielfach führt er bleibende oder nur schwer heilbare Schädigung der Gesundheit herbei, wie Lähmung einzelner Gliedmaßen oder der Sprache, Taubheit, Geistesstörung, Zerrüttung des Nervensystems ꝛc. Manche Leute mögen auch schon durch den großen Schrecken, den diese überwältigende Naturerscheinung hervorbringt, Schaden leiden. Ein- und Austrittsstelle des Blitzes sind meist nur durch kleine Brandwunden, versengte Haare oder Kleidungsstücke bezeichnet, oft gar nicht mehr erkennbar. Gröbere Zerreißung der Gewebe im Innern des Menschen kommt nicht vor.

Den Gefahren des Blitzschlages soll man sich weder unnötig noch leichtsinnig aussetzen. Man vermeide das Unterstehen unter alleinstehende, hohe Bäume, auch das Verweilen unter Gaslüstern, Thorwegen und offenen Fenstern, in der Nähe von Öfen und Herden, überhaupt jede Stellung, durch welche der menschliche Körper eine Lücke in der mutmaßlichen Blitzbahn ausfüllt. Doch ist Ängstlichkeit und selbstquälende Furcht eines Menschen unwürdig.

Siebenter Abschnitt.

Galvanische Elektrizität.

110. Erregung der galvanischen Elektrizität.

Wenn man Zink in verdünnte Schwefelsäure bringt, so wirken beide Stoffe chemisch aufeinander, es bildet sich Zinksulfat und freier Wasserstoff.

$$SO_4H_2 + Zn = SO_4Zn + H_2.$$

Mit sehr empfindlichen Elektroskopen kann man nun nachweisen, daß das aus der Flüssigkeit herausragende Zinkende negativ elektrisch, und die Flüssigkeit, welche man ja mittels eines Platindrahtes mit dem Elektroskop verbinden kann, positiv elektrisch ist. Zink ist demnach im stande, in Berührung mit Schwefelsäure Elektrizität zu erregen; es wirkt elektromotorisch, es hat eine elektromotorische Kraft.

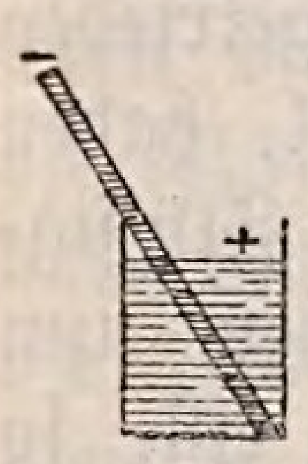


Fig. 130.

Ebenso findet man, daß Zink in Salz- oder Salpetersäure elektromotorisch wirkt. Ebenso wie Zink wirken auch andere Metalle elektromotorisch, wie Kupfer und Eisen, und man findet den allgemeinen Satz: **Wenn ein Metall mit einer Flüssigkeit in Berührung kommt, auf die es chemisch einwirkt, so tritt infolge der chemischen Einwirkung auch eine elektrische Wirkung auf derart, daß das Metall negativ, die Flüssigkeit positiv elektrisch wird.**

Wirkt das Metall nicht auf die Flüssigkeit wie Platin auf Wasser oder Schwefelsäure, so tritt auch keine elektrische Wirkung ein.

Da diese Elektrizitäten nicht durch Reibung oder Influenz hervorgerufen wurden, so unterscheidet man sie von der Reibungselektrizität durch die Bezeichnung: galvanische Elektrizität nach ihrem Entdecker Galvani, einem italienischen Arzte 1789. Die galvanische Elektrizität ist also blos nach ihrer Entstehungsart und Entstehungsursache von der Reibungselektrizität verschieden, in ihrem Wesen, ihren Wirkungen und Gesetzen aber mit ihr identisch.

Man findet die Ursache der Elektrizitätserzeugung hiebei in folgendem: wenn sich Zink in Schwefelsäure auflöst, so entsteht dabei auch eine gewisse Menge Wärme, die man die Verbrennungswärme des Zinkes nennt, weil sich das Zn hiebei mit dem O des Wassers verbindet, also verbrennt. Es entsteht aber hiebei nicht so viel Verbrennungswärme, als entstehen sollte, sondern anstatt eines Teiles der Verbrennungswärme tritt Elektrizitätserregung auf.

111. Stärke der elektromotorischen Kraft.

Je stärker ein Metall auf eine Flüssigkeit einwirkt, je größer die Wärmemenge ist, welche bei der Zersetzung zum Vorschein kommen sollte, desto größer ist das Potenzial der frei werdenden Elektrizitäten, desto größer ist die elektrische Potenzialdifferenz zwischen Metall und Flüssigkeit.

Man möchte glauben, daß, wenn man das Metall lange genug in der Flüssigkeit läßt, wenn sich also immer mehr und mehr Stoffe zersetzen, dann auch immer mehr Elektrizität produziert würde, und daß folglich die Dichte und damit das Potenzial der Elektrizität immer größer würde. Das ist jedoch nicht so, sondern das Potenzial wächst stets nur bis zu einer gewissen Grenze. Wenn sich nämlich ein Molekül Zn mit einem Molekül SO_4 verbindet und H_2 ausscheidet, so entsteht dabei eine gewisse Menge $\pm$ Elektrizität, wovon die $+$ E in die Flüssigkeit, die $-$ E auf das Zink getrieben wird. Diese Elektrizitäten entstehen in bestimmtem Potenzial, haben aber, da sie sich auf die großen Flächen des Zinkes und der Flüssigkeit verbreiten, nur eine viel geringere Spannung. Gehen nun immer mehr und mehr Moleküle in den chemischen Prozeß ein, so entstehen immer neue Mengen $\pm$ E, welche auch auf Zink und Flüssigkeit gebracht werden und so die Dichte und damit das Potenzial der schon dort befindlichen Elektrizitäten erhöhen. Dies geschieht auch, so lange das Potenzial der durch die chemische Zersetzung hervorgebrachten Elektrizität größer ist als das Potenzial der schon auf Zink und Flüssigkeit vorhandenen Elektrizität. Sind aber beide gleich stark geworden, so ist die erste nicht mehr imstande, die zweite zu verdichten, sie entsteht also nicht mehr, der elektrische Erregungsprozeß hört auf. **Die elektrische Potenzialdifferenz wächst nur bis zu einer gewissen Grenze.**

Man möchte schließen, daß, wenn sich keine Elektrizität mehr bilden kann, dann auch der chemische Prozeß aufhören müßte. Dies ist auch in der That (nahezu) der Fall; wenn man nämlich chemisch reines Zink oder sehr gut amalgamiertes Zink (Zink, das man mit einer anhaftenden Schichte Quecksilber überzogen hat), in die Schwefelsäure taucht, so bemerkt man, daß sich wohl einige Bläschen H_2 bilden, daß damit aber der chemische Prozeß ebenso wie der elektrische aufhört. Hat man gewöhnliches Zink genommen, so ladet sich auch Zink und Flüssigkeit mit Elektrizität von gewisser, ebenso großer Potenzialdifferenz, aber der chemische Prozeß dauert fort; es entsteht aber dann keine Elektrizität mehr, sondern die Verbrennungswärme wird als solche frei.

Man mißt die elektromotorische Kraft zweier Substanzen, z. B. Zink und Schwefelsäure, dadurch, daß man die zwischen ihnen auftretende Potenzialdifferenz der getrennten Elektrizitäten mißt. Nimmt man nun verschiedene Metalle und verschiedene erregende Flüssigkeiten, und mißt stets die dadurch entstehende elektrische Potenzialdifferenz, so findet man den eingangs erwähnten Satz bestätigt: je stärker die Stoffe auf einander einwirken, desto größer ist diese Potenzialdifferenz, desto größer also die elektromotorische Kraft.

112. Gesetze für die elektromotorische Kraft.

In Bezug auf die elektromotorische Kraft gelten nachfolgende Sätze: **Die elektromotorische Kraft wirkt unabhängig vom elektrischen Zustande der beiden Stoffe.** Wenn etwa beide Stoffe, Zink und Schwefelsäure, schon elektrisch sind, etwa durch eine Elektrisiermaschine geladen sind, beide mit einem Potenzial, das wir mit $+ 17$ bezeichnen wollen, und sie werden nun in Berührung gebracht, so wirkt die elektromotorische Kraft etwa so, daß das Zink $- 8$ und die Flüssigkeit $+ 3$ an elektrischem Potenzial bekommen sollte; deshalb erhält das Zink ein elektrisches Potenzial $= 17 - 8 = 9$, die Flüssigkeit ein Potenzial $= 17 + 3 = 20$. Es ist dann dieselbe Potenzialdifferenz $= 11$ vorhanden, wie wenn beide Stoffe zu Anfang gar keine Elektrizität gehabt hätten.

Die durch die elektromotorische Kraft hervorgebrachte Potenzialdifferenz ist unabhängig von der Größe der verwendeten Stoffe. Sind beide Stoffe klein, so zersetzen sich nur wenig Moleküle derselben und die hervorgebrachte Elektrizität ist an Menge gering; aber weil sie sich nur über kleine Flächen auszubreiten hat, ist sie ausreichend, um eine entsprechende Potenzialdifferenz hervorzubringen. Sind beide Stoffe sehr groß, so müssen sich sehr viele Moleküle derselben zersetzen bis auf den großen Flächen die Elektrizität eine entsprechende Potenzialdifferenz hat. Bei den ge-

wöhnlichen Versuchen, wobei ein Zinkstab in eine Tasse Schwefelsäure gesenkt wird, genügt eine ungemein kurze Zeit, um so viele Moleküle zu zersetzen, bis beide Stoffe vollständig geladen sind; die entsprechende Spannungsdifferenz ist momentan hergestellt. Nur wenn beide Stoffe sehr groß sind, wenn etwa das Zink mit einem sehr langen Drahte, die Flüssigkeit mit dem Meere in Verbindung gesetzt wird, verfließt eine meßbare Zeit, bis so viele Moleküle zersetzt sind, daß beide Stoffe mit Elektrizität von entsprechendem Potenzial geladen sind.

Sind beide Stoffe der Größe nach verschieden, so sind die Potenziale der auf ihnen befindlichen freien Elektrizitäten auch verschieden, so daß auf dem größeren Stoffe das Potenzial geringer ist. Die Mengen der bei der Zersetzung produzierten + und — E sind nämlich einander gleich; ist nun etwa ein kleiner Zinkstab in ein sehr großes Gefäß mit Schwefelsäure gestellt, so hat die — Elektrizität auf dem kleinen Zink ein größeres Potenzial als die + Elektrizität auf der großen Flüssigkeit, z. B. — 8 E und + 3 E; die Differenz beider Potenziale entspricht aber stets der elektromotorischen Kraft des Systems Zink-Schwefelsäure.

Verbindet man das Zink mit der Erde, macht ihn also dadurch zu einem ungemein großen Leiter, so hat er das Potenzial = 0, also hat die isolierte Flüssigkeit ein Potenzial, das der elektromotorischen Kraft entspricht etwa + 11; wenn man die Flüssigkeit (durch einen Platindraht) mit der Erde verbindet, so hat die Flüssigkeit ein Potenzial = 0, also das Zink — 11 E. **Wird einer der beiden Stoffe zur Erde abgeleitet, so ist sein Potenzial = 0, die des anderen gleich der ganzen Potenzialdifferenz, welche der elektromotorischen Kraft des Systems entspricht.**

Wenn zwei Metalle zugleich in derselben Flüssigkeit wirken, so schwächen sich ihre elektromotorischen Kräfte, indem jede unabhängig von der andern wirkt, aber in entgegengesetztem Sinne. Ist etwa ein Zink- und ein Kupferdraht zugleich in Schwefelsäure, so wirkt einerseits das Zink und bringt auf sich — 100 E, auf dem Kupfer, das ja mit der Flüssigkeit in Berührung steht, + 100 E hervor, andrerseits wirkt aber auch das Kupfer und bringt auf sich — 37 E, auf dem Zink + 37 E hervor; die Folge ist, daß auf dem Zink — 63 E, auf dem Kupfer + 63 E vorhanden ist.

113. Elektromotorische Kraft mehrerer Elemente.

Nennen wir eine solche Zusammenstellung eines Zink- und Kupferstabes (oder -Bleches) in Schwefelsäure ein Voltasches Element, nennen die herausragenden Metallenden seine Pole, und bezeichnen die elektromotorische Kraft desselben mit 2 E, so daß etwa Zink — E, Kupfer + E hat, und verbinden nun zwei solche Ele-

mente derart, daß man das Kupfer des ersten mit dem Zink des zweiten Elements verbindet, so haben die verbundenen Metalle ein Potenzial = 0, da + und − E sich aufheben; das freie Zink des ersten hat also − 2 E, das freie Kupfer des zweiten + 2 E. Hat man 3 Elemente und verbindet stets das Kupfer des vorhergehenden mit dem Zink des folgenden, so haben je zwei verbundene Metalle dieselbe Elektrizität, und zwischen zwei durch die Flüssigkeit getrennten Metallen muß eine elektrische Potenzialdifferenz von 2 E vorhanden sein; demnach hat man etwa die Verteilung wie in Fig. 131. Oder wenn man etwa das freie Kupferende zur Erde ableitet, so ist seine Elektrizität = 0, demnach hat man die Verteilung wie in Fig 132. Ebenso etwa bei 4 Elementen unter Anwendung derselben Gesetze hat man die Verteilung wie in Fig. 133. Man erkennt, wie es weiter geht, man sieht, daß die Spannungsdifferenz der beiden freien Pole bei 4 Elementen = 8 E = 4·2 E ist, sieht also, daß eine Zusammenstellung von 4 Elementen gerade so wirkt, wie ein Element von 4mal stärkerer elektromotorischer Kraft. Man sagt demnach: **die elektromotorische Kraft mehrerer mit ungleichen Polen verbundener Elemente ist gleich der Summe der elektromotorischen Kräfte der einzelnen Elemente.**

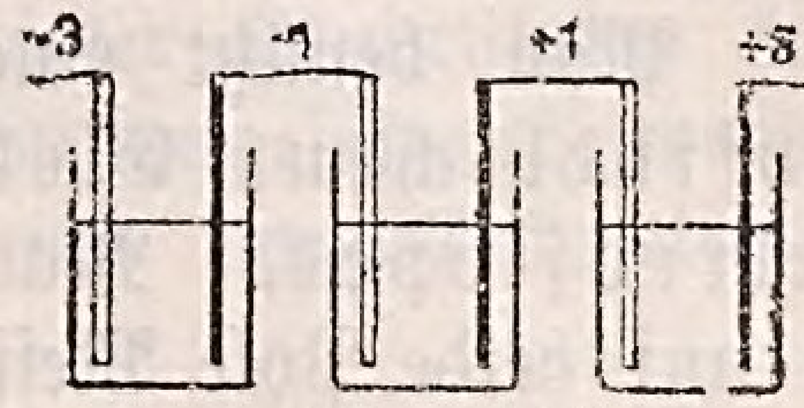


Fig. 131.

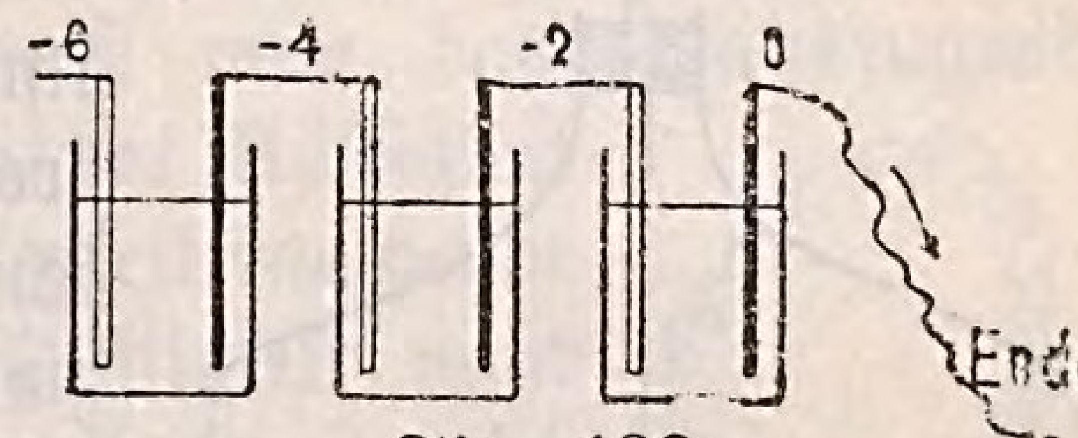


Fig. 132.

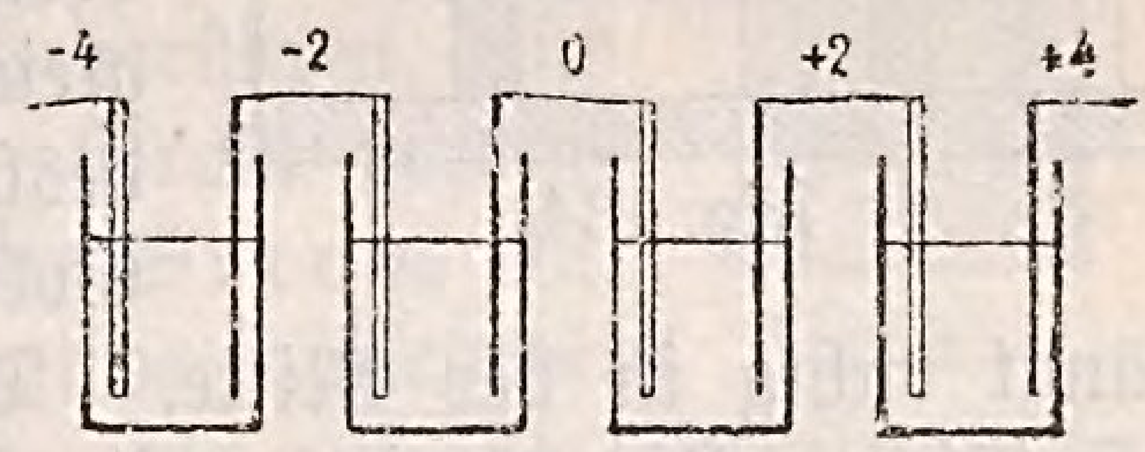


Fig. 133.

114. Die Zamboni'sche Säule und deren Anwendung.

Auf dem Satze von der Summierung der elektromotorischen Kräfte beruht die Zamboni'sche oder die trockene Säule. Wenn man unechtes Gold- und Silberpapier (Kupfer- und Zinkpapier) mit den Papierflächen auf einander klebt und daraus etwa thalergroße Scheibchen schneidet, so stellt jedes solche Scheibchen ein, wenn auch schwach wirkendes Element dar, bei dem die Schwefelsäure vertreten ist durch die Feuchtigkeit des Kleisters. Wenn man nun viele solche Scheibchen auf einander legt, so daß immer die Kupferseite des vorhergehenden und die Zinkseite des folgenden sich berühren, so hat man eine Verbindung sehr vieler Elemente; die nach außen schauende Zinkseite des ersten und die Kupferseite des letzten Elementes sind die freien Pole dieser Zusammenstellung, welche man eine Zamboni'sche Säule nennt (1812). Die elektromotorische Kraft derselben ist, wenn man mehrere Hundert, ja Tausend solcher Scheibchen nimmt, sehr groß, deshalb ist auch das

Potenzial der freien Elektrizität auf den Polen meist so groß, daß sie schon mit einem gewöhnlichen Goldplatt-Elektroskope nachgewiesen werden kann.

Man benützt eine solche Säule zu Herstellung eines sehr empfindlichen Elektroskopes, des Bohnebergerschen Elektroskopes. Man schließt die Säule in eine Glasröhre ein, legt auf beide Pole Messingplatten und führt von diesen Drähte weg, die sich mit ihren Enden nähern und in geringem Abstand in zwei Messingplättchen endigen; diese sind nun die Pole. Über ihnen befindet sich der Stift eines Elektroskopes und von diesem hängt ein langes, schmales Goldplättchen herunter gerade zwischen die beiden Polplatten. Das Ganze befindet sich unter einem Glassturze, aus welchem nur der Knopf des Elektroskops herausragt. Die beiden Polplatten sind gleich stark und entgegengesetzt elektrisch; deshalb wird das zwischen ihnen hängende Goldplättchen von keiner angezogen und hängt ruhig in der Mitte. Teile ich nun dem Knopfe etwas Elektrizität, z. B. negative, mit, so wird das Goldplatt auch —, also wird es vom + Pole angezogen und vom — Pole abgestoßen und bewegt sich auf den + Pol zu. Hiebei genügen schon sehr geringe Mengen Elektrizität, um einen Ausschlag zu bewirken, weshalb dies Elektroskop viel empfindlicher ist, als das gewöhnliche.

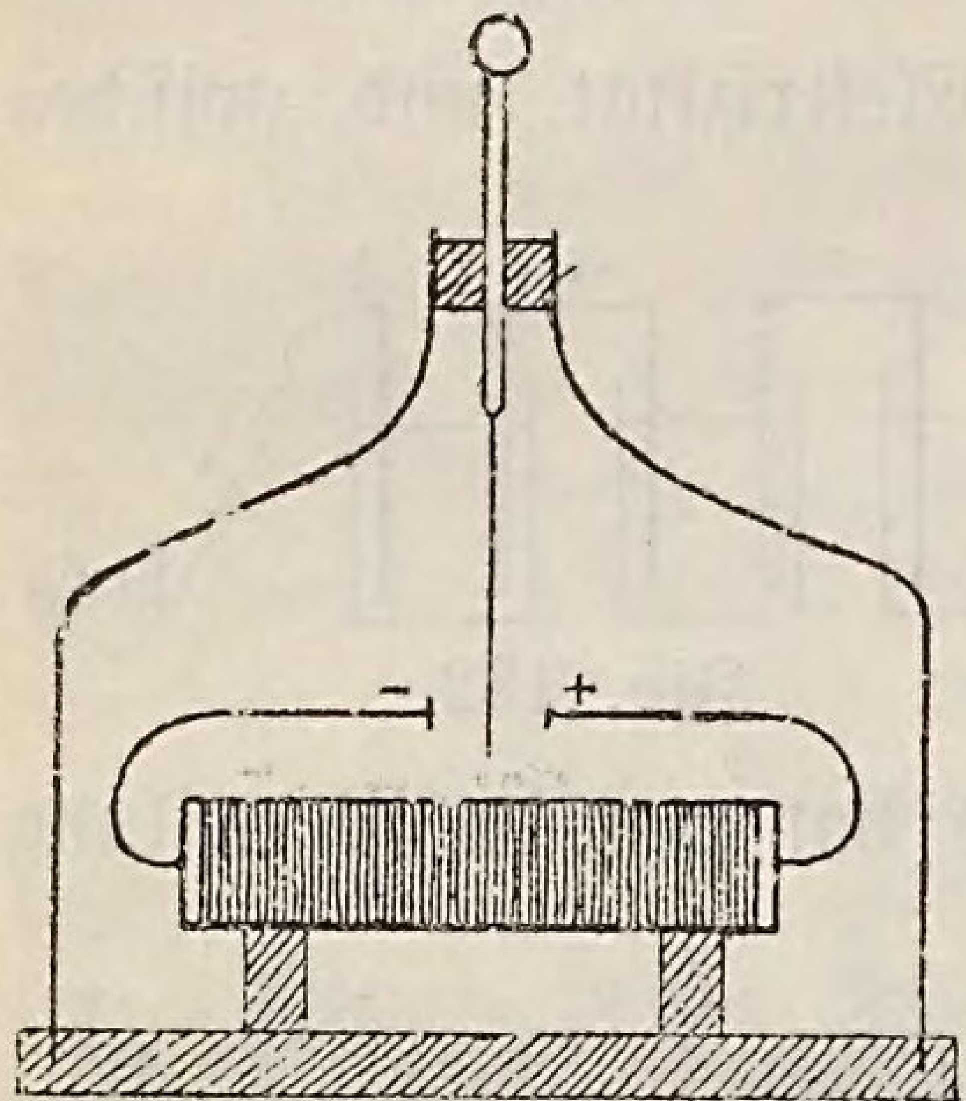
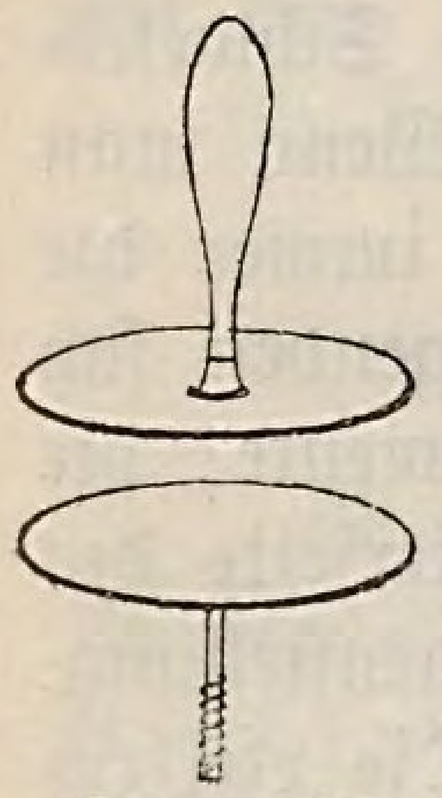


Fig. 134.

Noch empfindlicher wird dies Elektroskop durch Anwendung von Kondensation der Elektrizität, wie sie beim Fechner'schen Elektroskop angebracht wird. Man schraubt nämlich auf den Knopf dieses Elektroskopes eine gut abgeschliffene Messingplatte, die oben mit einer dünnen Firnißschichte versehen ist und die Stelle der Kollektorplatte spielt. Auf sie setzt man mittels eines gläsernen, also isolierenden Handgriffes eine eben solche, unten gefirnißte Messingplatte, die Kondensatorplatte; die Firnißschichte zwischen beiden stellt den starren Isolator dar. Wenn man nun die untere Platte mit einer Elektrizitätsquelle in Verbindung setzt, deren Potenzial so gering ist, daß sie am Elektroskope keinen Ausschlag gibt, zugleich aber die obere Platte aufsetzt und ableitend mit dem Finger berührt, so sammelt sich auf beiden Platten vielmal mehr Elektrizität, da wegen der großen Annäherung der Platten die Verstärkungszahl eine sehr große ist. Entfernt man nun zunächst die Elektrizitätsquelle, dann die obere Platte, so verbreitet sich die ganze auf der unteren Platte angesammelte Elektrizitätsmenge auf dem ganzen Elektroskop, das Goldblättchen bekommt


Fig. 135.

also eine viel stärkere Elektrizität und gibt nun einen Ausschlag. Mit guten Apparaten dieser Art kann man nachweisen, daß das in Schwefelsäure steckende Zink negativ elektrisch ist, also den Fundamentalversuch des Galvanismus machen. Dieser Kondensator kann auch auf ein gewöhnliches Goldblatt-Elektroskop aufgeschraubt werden, und wurde so von Volta 1755 erfunden und zum Nachweise der galvanischen Elektrizität benutzt 1794.

115. Der galvanische Strom.

Sollen die durch die elektromotorische Kraft getrennten Elektrizitäten sich wieder vereinigen, so muß man das herausragende Zinkende durch einen metallischen Draht mit der Flüssigkeit in Verbindung bringen; das in die Flüssigkeit tauchende Ende des Drahtes darf aber von der Flüssigkeit nicht angegriffen werden, oder nur schwächer elektromotorisch wirken als Zink. Man macht das am einfachsten so, daß man eine Zink- und eine Kupferplatte in die Schwefelsäure taucht, ohne daß sie sich berühren, und die herausragenden Enden durch einen Draht verbindet. Es tritt dann der galvanische Strom ein, indem einerseits vom Zinkpole die negative Elektrizität des Zinkes, andrerseits vom Kupferpole die positive Elektrizität der Flüssigkeit in den Draht läuft; beide begegnen sich irgendwo auf dem Draht und heben sich auf. Der Prozeß hört damit aber nicht auf, beständig bilden sich durch die elektromotorische Kraft des Systems neue Elektrizitäten und beständig laufen diese durch den Draht und heben sich auf. **Das beständige Fließen der Elektrizität nennt man einen elektrischen oder galvanischen Strom.** Sind beide Pole verbunden, so sagt man, der Strom ist geschlossen, er fließt; sind sie nicht verbunden, so sagt man, der Strom ist offen, er fließt nicht.

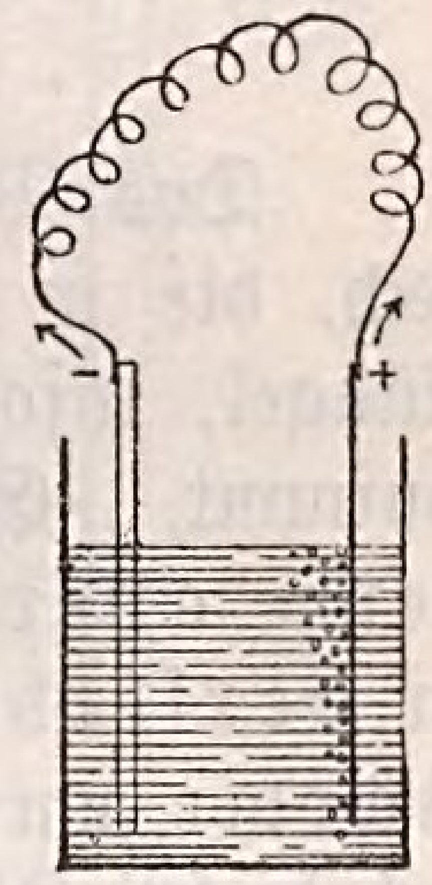


Fig. 136.

Bei Stromschluß dauert der chemische Prozeß fort, beständig wird Zink von Schwefelsäure aufgelöst; aber man bemerkt dabei, daß der durch die chemische Zersetzung frei werdende Wasserstoff nicht am Zink aufsteigt, sondern am Kupfer; er gelangt ganz unsichtbar bis zum Kupfer und man kann sich diese Wanderung des H_2 etwa folgendermaßen vorstellen. Das Zn zersetzt die Schwefelsäure SO_4H_2, und zwar das nächstliegende Molekül, indem es sich mit dem Radikal SO_4 verbindet zu $ZnSO_4$; dadurch wird H_2 frei, das verbindet sich mit dem SO_4 des

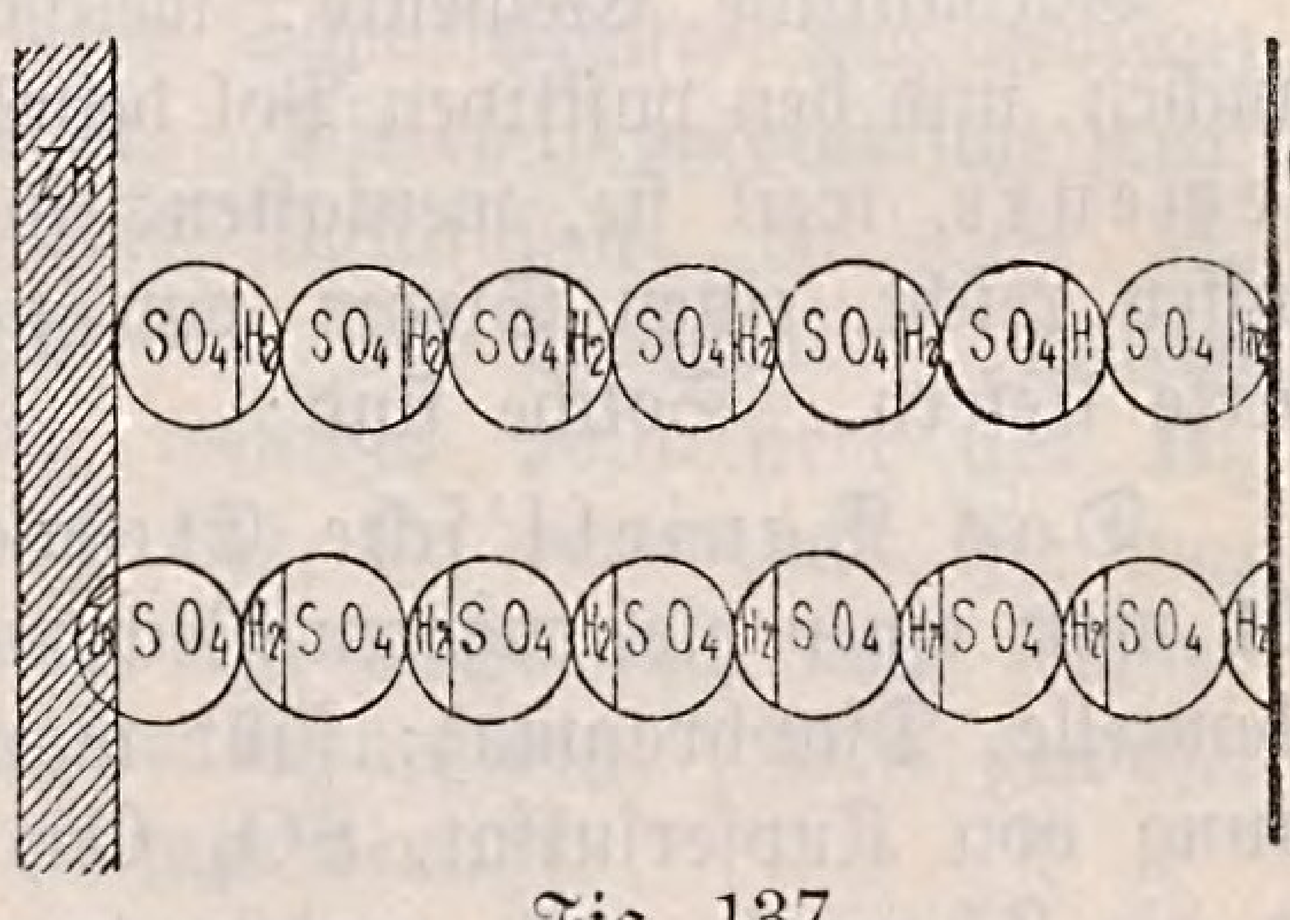


Fig. 137.

nächstliegenden $SO_4\ H_2$ und bildet somit wieder $H_2\ SO_4$; dadurch wird wieder H_2 frei; dies tauscht sich ebenso aus gegen das H_2 des nächsten $SO_4\ H_2$, und so geht es fort bis schließlich das letzte H_2 am Kupfer frei wird, als Träger der positiven Elektrizität diesem seine positive Elektrizität mitteilt und dann als freies Gas entweicht. In Figur 137 ist oben die Reihe der Moleküle vor dem chemischen Angriff, unten nach demselben durch Zeichnung angedeutet. Das Wandern, gegenseitige Zersetzen der Moleküle tritt nicht nacheinander ein, wie beschrieben, sondern bei allen Molekülen (fast) zur selben Zeit.

116. Die galvanischen Elemente.

Das Voltasche Element, bestehend aus Zink- und Kupferblech, die in verdünnte Schwefelsäure getaucht sind, hat wesentliche Mängel, infolge deren der von ihm gelieferte Strom rasch an Stärke abnimmt. Es entwickelt sich nämlich Wasserstoff auch am Zink; wenn aber die Produkte einer chemischen Zersetzung an derselben Stelle zum Vorschein kommen, wird nur Wärme und keine Elektrizität produziert; es wird demnach hiebei Zink unnütz verbraucht; nur wenn und dadurch daß die Produkte einer chemischen Zersetzung an verschiedenen Orten zum Vorschein kommen, entsteht statt der Wärme Elektrizität; nur dasjenige Zink, dessen zugehöriger Wasserstoff am Kupfer aufsteigt, liefert Elektrizität. Durch Amalgamieren des Zinkbleches sucht man sich gegen den unnützen Verbrauch des Zinkes zu schützen, erreicht das aber oft nur unvollkommen. Ein weiterer Mangel des Voltaschen Elementes ist der, daß der Wasserstoff selbst elektromotorisch wirkt, und zwar dem Zink entgegengesetzt, daß er also die elektromotorische Kraft des Zinkes schwächt. Man sagt: der Wasserstoff polarisiert oder wirkt polarisierend. Man sucht deshalb den Wasserstoff wegzuschaffen, indem man ihn entweder durch ein weniger stark polarisierendes Metall ersetzt, oder ihn mit Sauerstoff sich verbinden läßt.

Galvanische Elemente, welche ihre Stoffe nicht unnütz verbrauchen, und den positiven Pol depolarisieren, nennt man konstante Elemente, weil sie, wenigstens so lange ihr Vorrat an wirksamen Stoffen reicht, einen Strom von nahezu gleichbleibender, konstanter Stärke liefern. Solche sind:

Das Daniell'sche Element (1836). In ein Becherglas stellt man einen viel engeren Becher aus porösem, unglasiertem Thone [Thonzelle, Diaphragma]; füllt man das Glas mit einer gesättigten Lösung von Kupfersulfat, $SO_4\ Cu$, (Kupfervitriol, blauer Vitriol) und die Thonzelle mit verdünnter Schwefelsäure, so stehen beide Flüssigkeiten durch die Poren des Thones in Verbindung, ohne sich

(rasch) mischen zu können. Man stellt nun in die Schwefelsäure einen Zinkcylinder oder Zinkblock und in das Kupfersulfat ein Kupferblech.

Beim Stromschluß findet folgender chemische Vorgang stat Zn verbindet sich mit dem nächsten SO_4 zu $ZnSO_4$; dadurch wird H_2 frei; dieses wandert durch die ganze Schwefelsäureschichte (wie beim Voltaschen Elemente). Trifft nun schließlich das H_2 auf das erste Molekül SO_4Cu außerhalb des Diaphragmas, so verbindet es sich mit dem SO_4 desselben zu SO_4H_2; es wird also das durch Zn verbrauchte SO_4H_2 wieder gebildet; das Cu dieses SO_4Cu wandert nun ebenso durch die ganze Schichte des SO_4Cu; das letzte Cu Molekül wird am Kupferbleche frei und schlägt sich dort als metallisches Cu nieder. Natürlich geschehen alle diese Vorgänge in raschester Aufeinanderfolge, innerhalb der kleinen Dimensionen solcher Elemente geradezu gleichzeitig. In Zeichen kann man diesen Vorgang so darstellen:

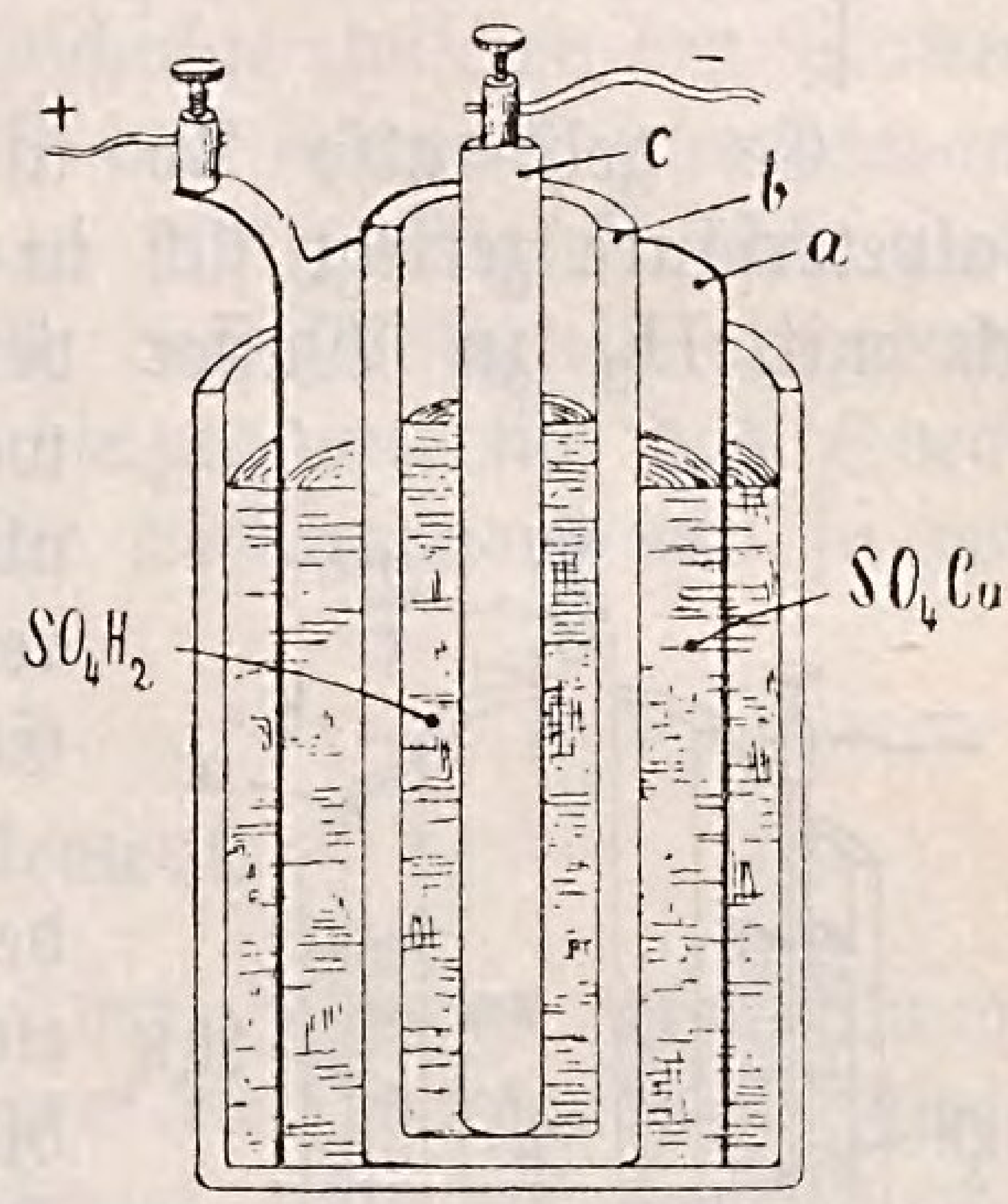


Fig. 138.

$$\Big|\ Zn\ \Big|\ SO_4H_2 \ldots SO_4H_2 \ldots\ldots\ldots SO_4Cu \ldots SO_4Cu\ \Big|\ Cu\ \Big|$$

Das Produkt links ist SO_4Zn, das Produkt rechts ist Cu, die Menge des freien SOH_2 bleibt erhalten, die Menge des SO_4Cu nimmt ab.

Hiebei wird Zn —, Cu + elektrisch.

Das Element ist nicht sparsam; denn ein großer Teil des Zinkes läßt das H_2 direkt entweichen; dabei wird nicht nur keine Elektrizität erzeugt, sondern auch keine Schwefelsäure neu gebildet, weshalb diese meist bald verbraucht ist. Die elektromotorische Kraft des Elementes ist größer als die des Voltaschen, da nicht H_2, sondern das an seine Stelle tretende Cu sich ausscheidet, welches weniger elektromotorisch wirkt, also weniger polarisiert als H_2. Das Element bleibt thätig bis alles SO_4Cu verbraucht ist; man nimmt also große Mengen desselben, legt wohl auch noch Kupfervitriolkrystalle ein, die sich dann nach Bedarf auflösen. Mit gewissen Abänderungen wird es noch heute vielfach benützt.

Das Grovesche Element (1839). In ein Becherglas stellt man eine Thonzelle, füllt das Glas mit verdünnter Schwefelsäure,

die Zelle mit konzentrierter Salpetersäure und stellt in erstere ein Zinkblech und in letztere ein Platinblech. Chemischer Vorgang:

$$\left| \; Zn \; \middle| \; \overbrace{SO_4 \, H_2} \ldots \overbrace{SO_4 \, H_2 \ldots O} \, \overbrace{NO_2 H \ldots O} \, NO_2 H \; \middle| \; Pt \; \right|$$

Es geht also Zn in Lösung und bildet Zinksulfat. Die Salpetersäure zerlegt sich in Untersalpetersäure NO_2H und O, das sich mit H_2 zu Wasser verbindet. Die Untersalpetersäure steigt, wenn sie im Überschusse vorhanden ist, als brauner, ungesunder, zum Husten reizender Dampf auf, weshalb man das Element mit einem Glasdeckel verschließt.

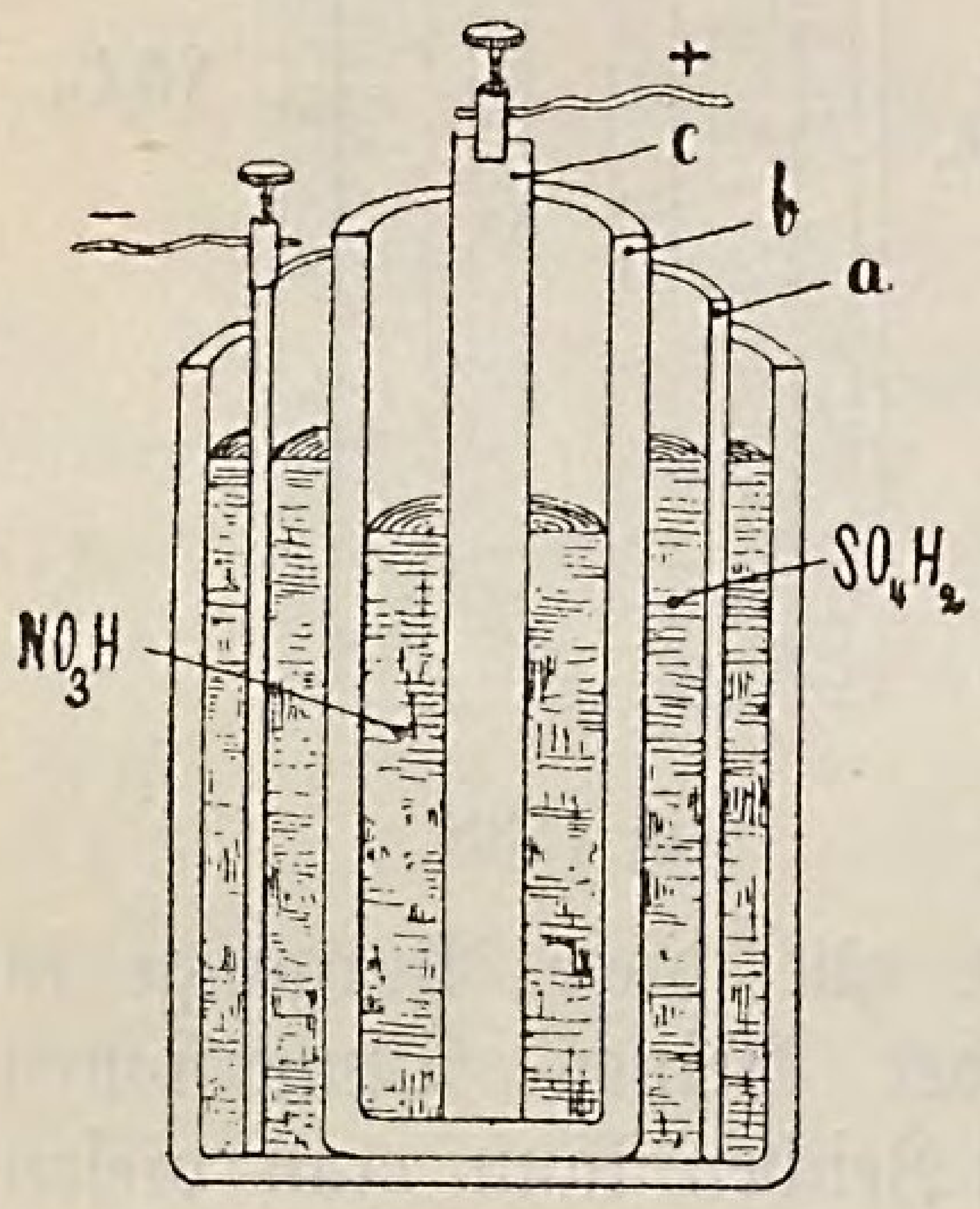


Fig. 139.

Das Element ist nicht sparsam aus demselben Grunde wie früher; aber seine elektromotorische Kraft ist sehr groß; da die entstehende Untersalpetersäure am Platin nicht elektromotorisch wirkt, also das Element die ganze, ungeschwächte, elektromotorische Kraft des Zinkes besitzt.

Das Element ist teuer im Betrieb, weil es zwei Säuren verbraucht, wird aber für manche Zwecke noch angewandt.

Das Bunsensche Element (1842) ist ebenso eingerichtet, nur ist das teure Platinblech durch einen Block galvanischer Kohle ersetzt; das ist eine harte, poröse Kohle, welche sich bei der Gasfabrikation an den Wänden der Retorten ansetzt; sie wird pulverisiert, mit Syrup zu einem steifen Teig angemacht, geformt und geglüht.

Das Chromsäure-Element (Bunsen). Man bereitet sich eine Mischung aus 0,765 *kg* Kaliumbichromat (saurem chroms. Kal.) 0,832 *l* Schwefelsäure (sp. G. 1,836) und 9,2 *l* Wasser und bringt in diese Mischung eine Zink- und eine Kohlenplatte ohne Diaphragma.

Die Mischung erhält Chromsäure als depolarisierende, Kaliumsulfat als neutrale und Schwefelsäure als erregende Substanz. Zn bildet damit $SO_4\,Zn$; das H_2 reduziert die Chromsäure zu Chromoxyd, letzteres bildet mit $SO_4\,H_2$ Chromsulfat, das sich mit dem Kaliumsulfat zu einem Doppelsalz, Chromalaun, zusammensetzt. Diesen und Zinksulfat hat man dann schließlich in Lösung.

$$Gr_2\,O_7\,K_2 + 7\,SO_4\,H_2 + 3\,Zn = (K_2\,SO_4 + Cr_2\,(SO_4)_3) + 3\,SO_4\,Zn + 7\,OH_2$$

Das Element hat eine hohe elektromotorische Kraft, weil H_2 beseitigt wird; es ist einfach zusammengesetzt, weil es keine Thonzelle

hat, ist zwar nicht sparsam, weil die Zersetzung auch bei offenen Polen andauert, wird jedoch so eingerichtet, daß die Zink= (und Kohlen)platten beim Nichtgebrauch aus der Flüssigkeit bequem heraus=gehoben und beim Gebrauch eingetaucht werden können (Tauch=element), und wird so besonders von Ärzten vielfach gebraucht. Wenn bei ruhigem Stehen die Flüssigkeitsschichte zwischen den Platten frei von Chromsäure geworden ist, so ist das Element sehr schwach geworden; durch Schütteln oder Umrühren der Flüssigkeit sucht man das zu verhüten. Man setzt wohl auch der Flüssigkeit ein paar Tropfen salpetersaures Quecksilberoxydul hinzu, weil sich das Queck=silber davon am Zink ausscheidet, dasselbe amalgamiert und so vor unnützem Angriff etwas schützt.

Das Meidinger Element.

Das einfachste Meidinger=Element hat folgende Einrichtung. In ein geräumiges Becherglas wird oben ein dickwandiger Zink=cylinder eingehängt und auf den Boden ein Kupferblech gelegt, von dem ein durch Kautschuk isolierter Draht nach oben herausführt. Das Glas wird gefüllt mit Wasser, in dem etwas Zinksulfat (etwa $1/_6$ gesättigt) oder etwas (5 %) Bittersalz (Magnesiumsulfat) aufgelöst ist. Man wirft nun einige Kupfervitriol=krystalle hinein, die sich rasch auflösen und das Kupferblech mit einer gesättigten Lösung von Kupfersulfat bedecken. Die Lö=sung bleibt wegen ihres größeren spezifischen Gewichtes am Boden liegen und gelangt, wenn das Element ruhig steht, nur sehr langsam nach oben.

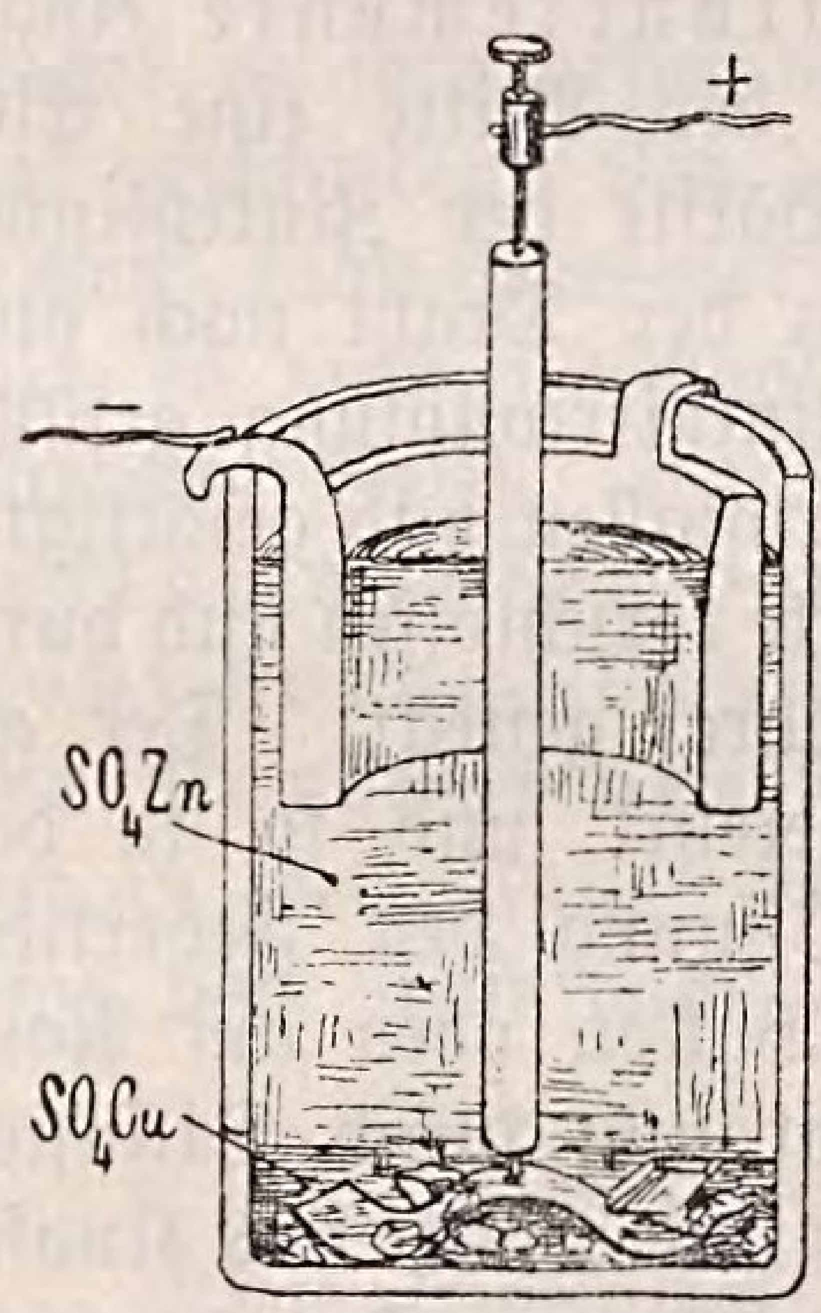


Fig. 140.

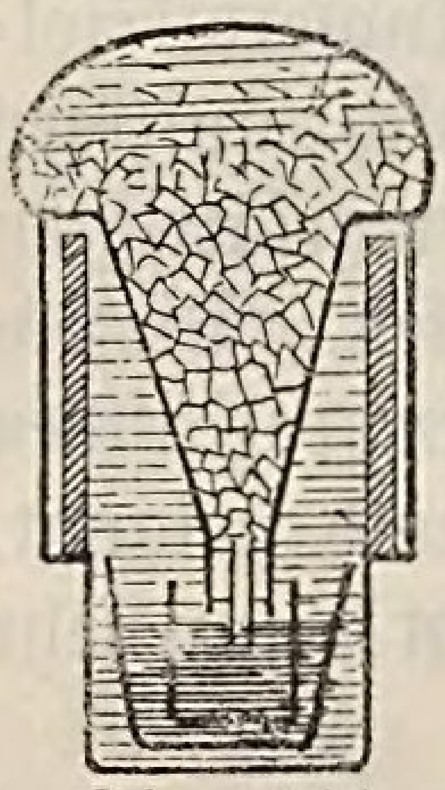
Man kann nicht gut annehmen, daß der chemische Angriff vom Zink aus geschehe, da dasselbe nicht im stande ist, SO_4Zn oder SO_4Mg zu ersetzen, sondern man muß annehmen, daß der Angriff dort erfolgt, wo die zwei Flüssigkeitsschichten von SO_4Mg und SO_4Cu an einander grenzen. Chemischer Vorgang:

Zn	SO_4 Mg . . . . . SO_4Mg SO_4 Cu . . . . SO_4 Cu	Cu

Es geht also Zn in Lösung, bis die Flüssigkeit damit gesättigt ist, was sehr lange dauert; Cu geht aus der Lösung und der vor=handene Kupfervitriol wird verbraucht, kann aber leicht ersetzt werden, indem man nach Bedarf weitere Kupfervitriolkrystalle hineinwirft.

Der Hauptvorteil des Elementes besteht in seiner Sparsamkeit; weil nämlich keine freie Schwefelsäure vorhanden ist, wird kein Zn unnütz verbraucht. Wenn also der Strom geschlossen ist, so liefert jedes in Lösung gehende Zn dadurch, daß es wandert und sich gegen Cu austauscht, eine entsprechende Menge Elektrizität: wenn der Strom nicht geschlossen ist, wird gar kein Zink verbraucht, der chemische Prozeß ruht vollständig; nur wenn das Element lange Zeit gar nicht gebraucht wird, steigt etwas Kupfersulfat herauf bis zum Zinkcylinder und tauscht sein Cu gegen Zn aus, ohne Elektrizität zu produzieren. Bei mäßigem Gebrauche können solche Elemente mehrere Monate benützt werden, bis das Wasser ganz mit Zinksulfat gesättigt ist; man hat nur ab und zu etwas Kupfervitriol nachzulegen und das verdunstete Wasser zu ersetzen durch Regenwasser. Solche Elemente werden zum Telegraphieren benützt. Wenn im Daniellschen Element die freie Schwefelsäure im Innern der Thonzelle verbraucht ist, wirkt es doch noch weiter, so lange außen noch SO_4Cu vorhanden ist, es ist aber dann ein Meidinger-Element.

Noch bequemer sind die Meidinger Ballonelemente eingerichtet. Ein geräumiges Becherglas hat in der Mitte eine Einschnürung, auf dieser steht in der oberen Hälfte der Zinkcylinder und am Boden ist das Kupferblech, von dem der Draht nach aufwärts führt; das Glas wird mit schwacher Zinkvitriollösung gefüllt. Ferner wird ein geräumiger Glasballon mit Krystallen und gesättigter Lösung von Kupfersulfat gefüllt, mit einem Korke verschlossen und durch


Fig. 141.

denselben ein Federkiel (Glasröhre) gesteckt. Der gefüllte Ballon wird dann umgekehrt und so in das Becherglas gestellt, daß die Öffnung des Federkiels nahe am Boden ist und der Ballon oben am Rand des Glases aufsteht. Es strömt nun durch Diffusion Kupfersulfat aus dem Glasballon und bedeckt das Kupfer mit einer stets nahezu gesättigten Lösung. Der chemische Prozeß ist derselbe: Zn löst sich auf und eine entsprechende Menge Cu schlägt sich am Bleche nieder. Da die verbrauchte Menge Kupfervitriol sich aus dem Ballon ersetzt, und das Wasser nicht verdunsten kann, so dauert das Element, ohne weiterer Aufsicht zu bedürfen, bis zu einem Jahre und wird deshalb besonders zu Haustelegraphen benützt. Es wird so zusammengestellt, daß die vorhandenen Mengen von Zink, Wasser und Kupfervitriol nahezu gleich lange ausreichen; ist es demnach aufgebraucht, so muß es vollständig neu hergestellt werden.

Das Element von Leclanché. In einem Becherglase steht eine Thonzelle, gefüllt mit Braunsteinpulver, dem etwas Kohle beigemischt ist; im Braunsteinpulver steckt ein Kohlenblock. Im Glase befindet sich gesättigte Salmiaklösung, etwa $^1/_3$ voll, und darin steckt ein fingerdicker Zinkstab. Chemischer Prozeß: Das Zink zersetzt den

Salmiak und verbindet sich mit Chlor; Ammonium wird frei, wandert zum Braunstein und entreißt ihm Sauerstoff, das gibt Ammoniak, das sich bald verflüchtigt, und Manganoxyd. Die elektromotorische Kraft ist ziemlich groß = 1,3 Daniell, und das Element empfiehlt sich durch seine einfache Zusammensetzung. Ist der Zinkstab oder der Salmiak verbraucht, so ersetzt man sie; die Braunsteinfüllung ist meist so reichlich, daß sie für jahrelangen Betrieb ausreicht; zudem ist das Element sparsam; deshalb wird es zum Telegraphieren, besonders in Frankreich, und zu Haustelegraphen gebraucht.

Bei all diesen Elementen ist das Zink der negative Pol. Es gibt noch eine große Anzahl anderer Elemente von geringerer Wichtigkeit oder etwas anderer Einrichtung.

117. Wirkung des Stromes auf die Magnetnadel.

Entdeckung Örstedt's (1820). Leitet man einen galvanischen Strom durch einen Draht über eine Magnetnadel, etwa von Süd nach Nord, so wird die Magnetnadel abgelenkt; beim Aufhören (Öffnen) oder Entfernen des Stromes kehrt die Nadel in ihre ursprüngliche Richtung zurück. Man kann den Draht auf verschiedene Art der Nadel nähern, von oben, unten, vorn und hinten, kann jedesmal die Richtung des Stromes umkehren und so fort, so wird jedesmal die Nadel abgelenkt, und zwar nach folgendem einfachen Gesetz; man denke sich selbst in dem vom + Pole herkommenden elektrischen Strome schwimmend, den Kopf voran, das Gesicht der Nadel zugekehrt, so wird der Nordpol der Nadel stets nach links abgelenkt; also nur in dem Falle, wenn der Strom quer über die Nadel geht, etwa von West nach Ost, wird die Nadel gar nicht abgelenkt.

118. Galvanometer.

Diese Eigenschaft benützt man zur Herstellung von Galvanometern, das sind Apparate, durch welche das Vorhandensein eines Stromes nachgewiesen und auch dessen Stärke gemessen werden kann.

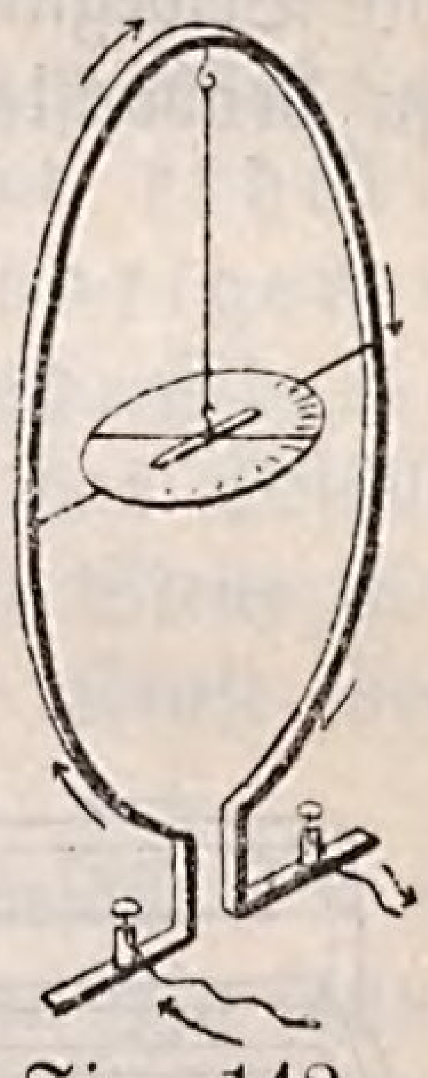


Fig. 142.

1) Die Tangentenbussole: ein großer und dicker Kupferring ist vertikal gestellt und unten offen, so daß dort der Strom eingeleitet werden kann. Eine Magnetnadel ist so an einem Seidenfaden aufgehängt, daß sie in des Ringes Mittelpunkte schwebt und über einer Kreisteilung sich dreht. Man stellt den Apparat so, daß die Ebene des Kupferringes mit der Richtung der Mangnetnadel übereinstimmt, also im magnetischen Meridian liegt. Bei Stromschluß wird die Nadel abgelenkt. Aus der Größe der Ablenkung schließt man auf die Stärke des Stromes. Wie das geschieht, und warum der Apparat Tangen=

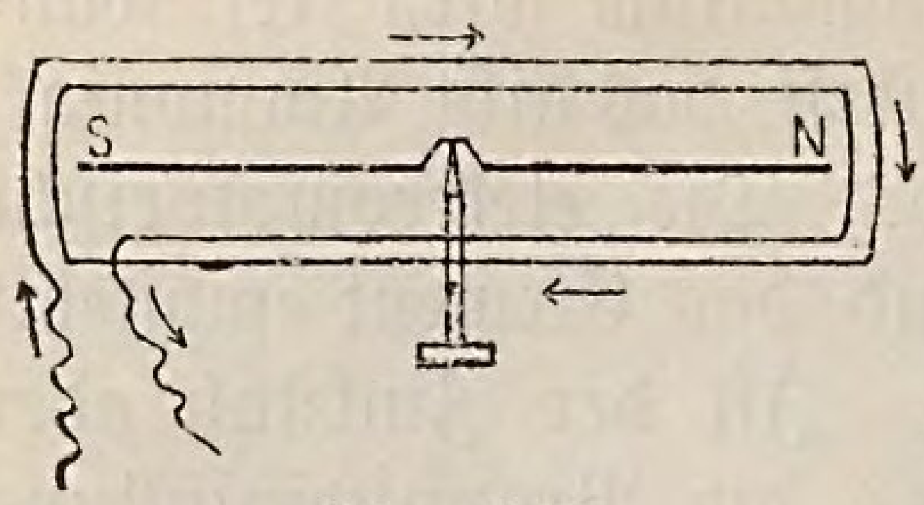
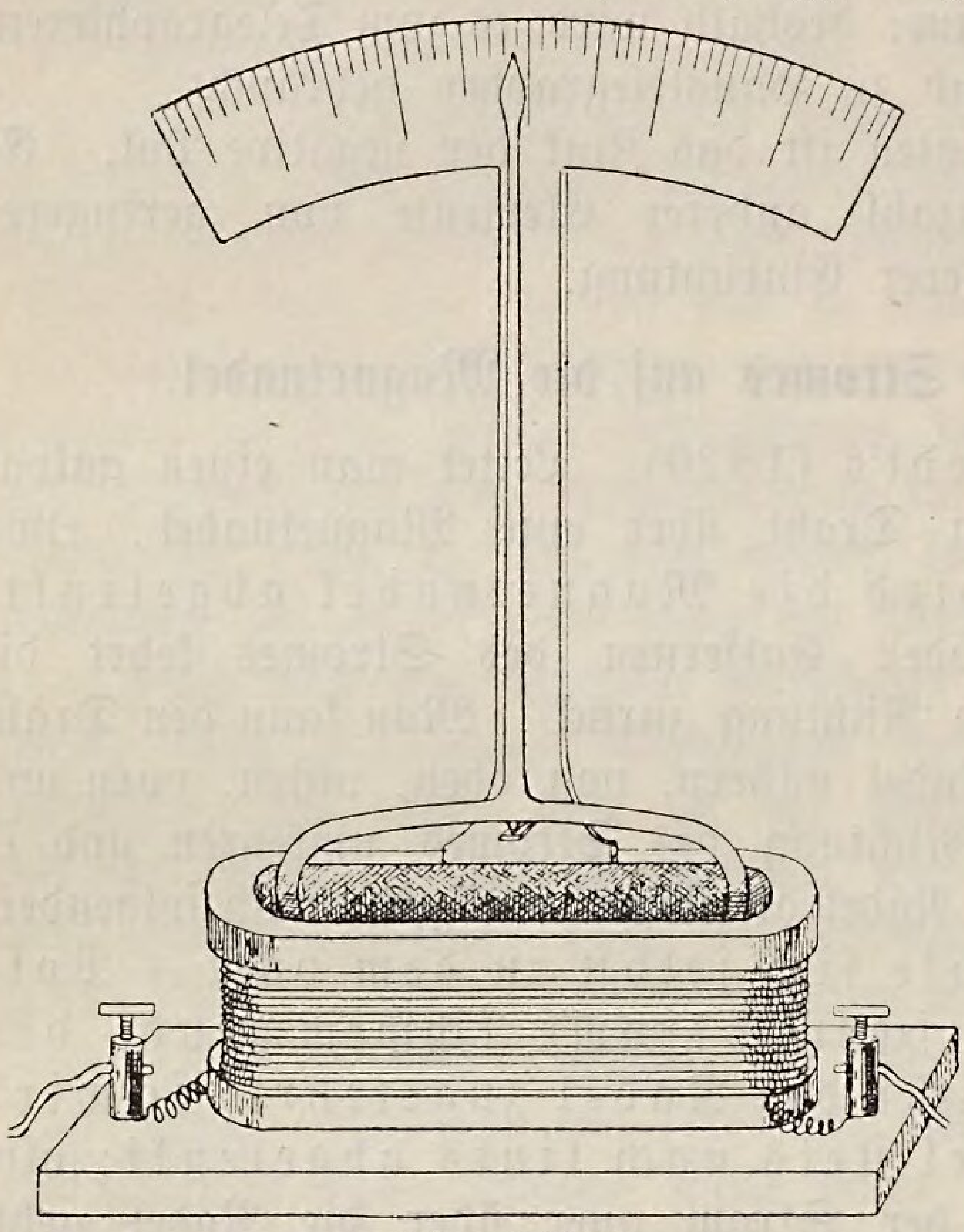


Fig. 143.

tenbussole heißt, kann erst später erklärt werden.

2) Das Galvanometer mit dem Schweiggerschen Multiplikator (1820) für schwache Ströme. Kupferdraht, der zur Isolierung mit Seide umsponnen ist, wird in vielen Windungen um eine passende Holzspule gewickelt, in deren Innerem die Magnetnadel frei hängt oder leicht drehbar aufgestellt ist. Jede Windung, welche der Strom durchläuft, wirkt für sich ablenkend auf die Nadel in demselben Sinne, deshalb verstärken sich ihre Wirkungen; das Drahtgewinde heißt Multiplikator; doch nennt man auch ein damit ausgestattetes Galvanometer kurz einen Multiplikator. In der Figur 143 sind die vielen Drahtwindungen, die bei sehr empfindlichen Apparaten oft viele Hunderte, ja Tausende sind, bloß durch zwei derselben angedeutet, und in Fig. 144 ist ein Vertikalgalvanometer dargestellt, welches die Bewegung der Magnetnadel an einem daran angebrachten Zeiger zu beobachten erlaubt.


Fig. 144.

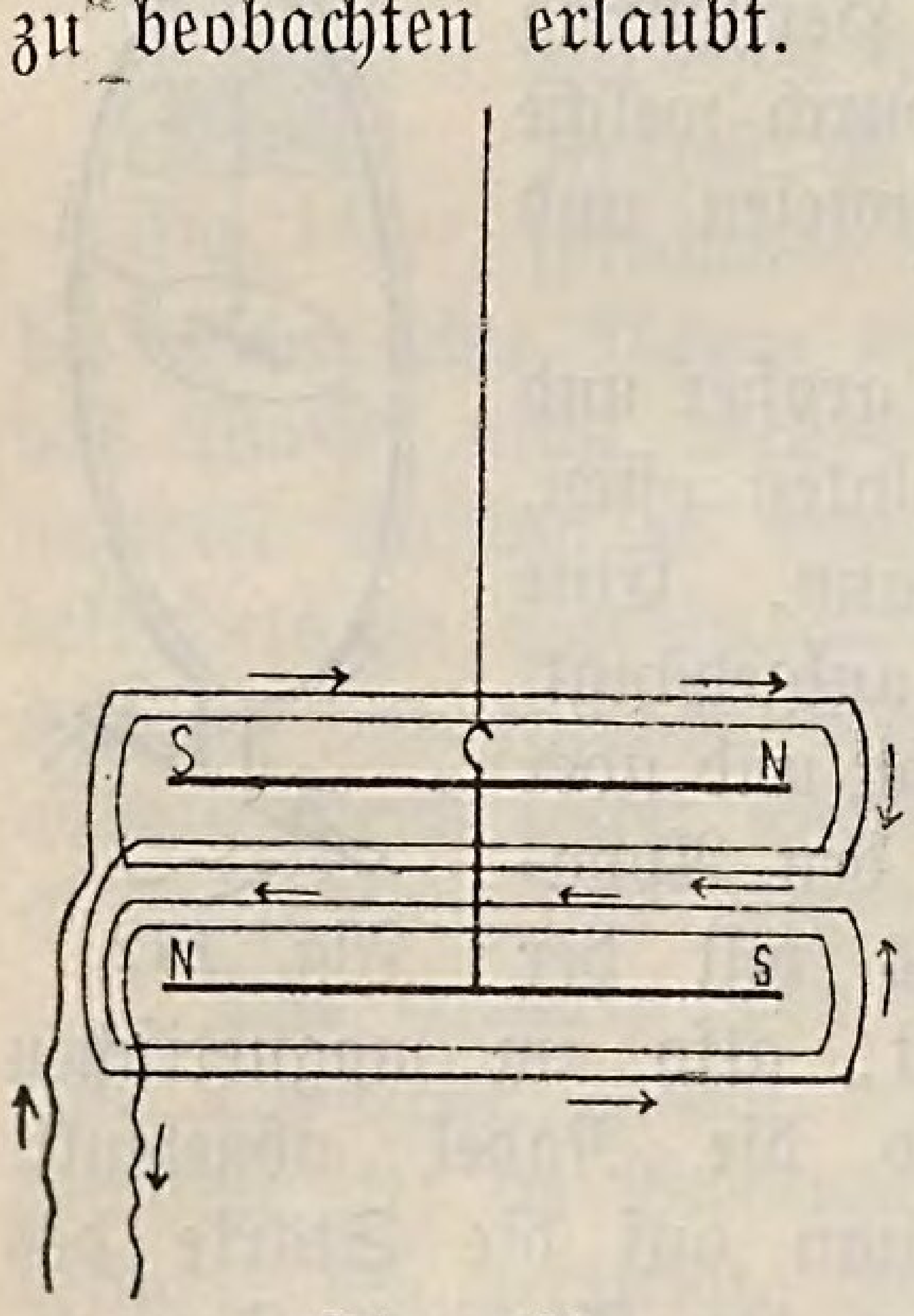


Fig. 145.

Zum Nachweise noch schwächerer Ströme nimmt man eine astatische Doppelnadel. Eine solche besteht aus zwei Magnetnadeln, die in ihren Mitten durch ein Stäbchen so verbunden sind, daß sie über einander stehen und ihre Pole nach entgegengesetzten Richtungen schauen. Sind die Nadeln gleich stark magnetisch, und hängt man diese Doppelnadel an einem Faden auf, so ist sie nicht mehr dem Einflusse des Erdmagnetismus unterworfen und bleibt in jeder Richtung stehen; denn die Erde sucht jede Nadel mit gleicher Kraft nach einer

anderen Richtung zu drehen. Nun werden beide Nadeln mit Multiplikatorwindungen umgeben, so daß, wenn der Strom durchgeleitet wird, beide Nadeln in demselben Sinne abgelenkt werden. Da die Nadel sich sehr leicht dreht, so können die schwächsten Ströme damit nachgewiesen werden.

119. Verteilung der Elektrizität in einem Strome. Ohmsches Gesetz über das Gefälle.

Durch die Wirkung der elektromotorischen Kraft bildet und befindet sich auf der Grenzfläche zwischen Zink und Flüssigkeit stets einerseits negative, andrerseits positive Elektrizität; beide fließen durch den äußeren Draht, den Schließungsdraht, treffen sich dort an irgend einer Stelle und gleichen sich aus. Es ist deshalb auf der ganzen Strecke zwischen Zink und der Ausgleichstelle freie negative Elektrizität, und auf der Strecke von Zink durch die Flüssigkeit bis zur Ausgleichstelle freie positive Elektrizität vorhanden, beidesmal in abnehmender Stärke. Die Abnahme des Potenzials der freien Elektrizität von den Polen bis zur Ausgleichstelle nennt man nach Ohm das Gefälle des Stromes. Man kann es darstellen durch eine Linie, deren Punkte von einer geraden Linie, welche den Verbindungsdraht vorstellt, um so weiter entfernt sind, je größer das Potenzial der freien Elektrizität an jeder Stelle ist; zeichnet man die Abstände nach aufwärts bei + E, nach abwärts bei — E, so hat man ein hübsches Bild des beständigen Gefälles vom + zum — Pol, etwa wie in Fig. 146.

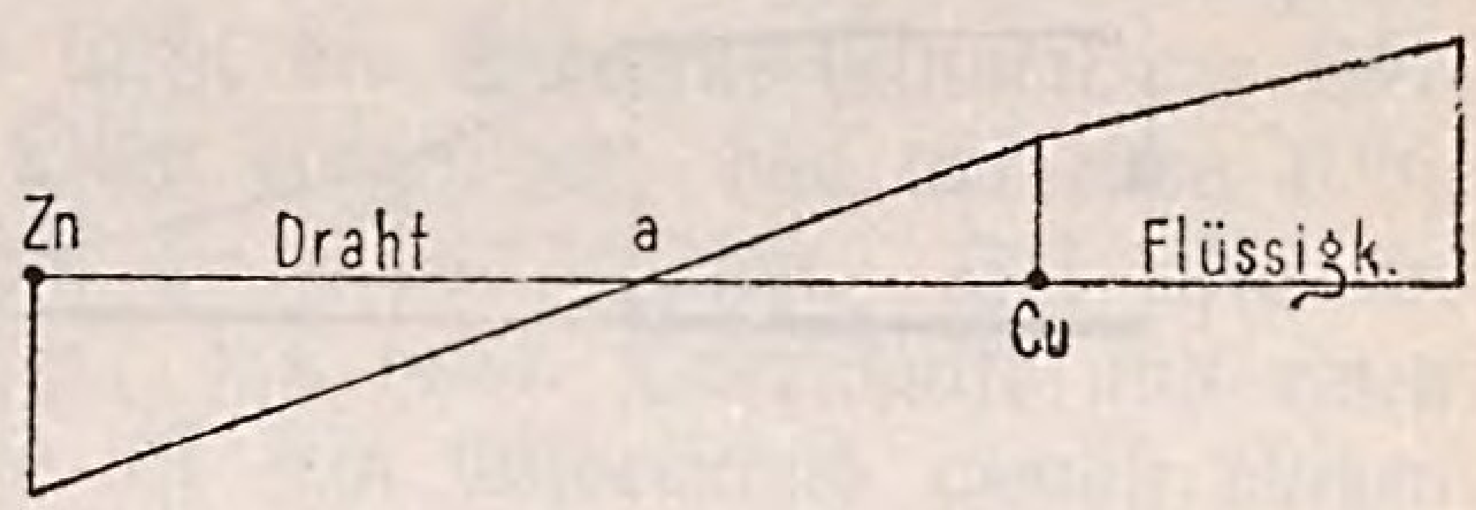


Fig. 146.

Indem jede Stelle von der benachbarten Stelle, welche höheres Potenzial hat, Elektrizität erhält, andrerseits an die benachbarte Stelle niedrigeren Potenzials Elektrizität abgibt, fließt durch jede Stelle des Drahtes Elektrizität, während gleichzeitig das Gefälle sich erhält. An den Polen wird die nach der nächsten Stelle abfließende Elektrizitätsmenge durch die elektromotorische Kraft des Elementes wieder ersetzt.

Leicht ist zu sehen, daß an keiner Stelle das Gefälle = 0 (horizontal) oder gar in entgegengesetztem Sinn vorhanden sein kann, da beidesmal durch weiteres Fließen der Elektrizität sofort das normale Gefälle wieder hergestellt werden würde.

Ohm'sches Gesetz über das Gefälle.

Jede Stelle des Stromkreises erhält so viel Elektrizität von der einen Seite, als sie nach der anderen

Seite abgibt; denn gäbe sie weniger ab, so würde sie Elektrizität ansammeln, ihr Potenzial müßte steigen, so daß sie einerseits von links nichts bekommen könnte, andrerseits nach rechts mehr abgeben würde. Da dieser Satz für jede Stelle gilt, so folgt: **Die Mengen der durch jeden Querschnitt des Stromkreises fließenden Elektrizität sind alle einander gleich. Die Menge der in einer Sekunde durch einen Querschnitt fließenden Elektrizität nennt man die Stromstärke;** die Stromstärke ist in jedem Teile des Stromquerschnittes dieselbe. Man vergleiche den galvanischen Strom mit einem Flusse, bei dem auch trotz Stromschnellen und Stromerweiterungen die Stromstärke in jedem Querschnitte dieselbe ist, d. h. bei dem auch in jeder Sekunde durch jeden Querschnitt gleich viel Wasser läuft.

Das Gefälle ist die Ursache des Fließens; je stärker das Gefälle ist, desto mehr Elektrizität fließt von Stelle zu Stelle, desto stärker ist der Strom. Besteht der Stromweg

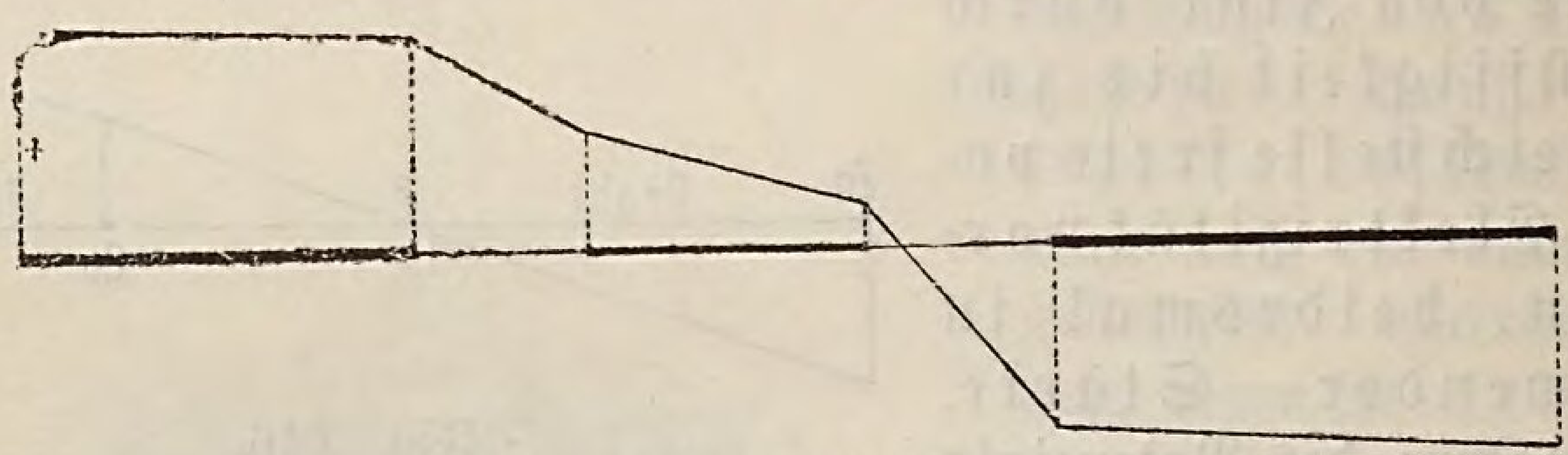


Fig. 147.

aus durchaus gleichmäßigem Material, also etwa gleich dickem Kupferdraht, so muß auch das Gefälle gleichmäßig sein. Besteht der Stromweg aus verschiedenartigem Material, z. B. verschieden dicken Drähten verschiedener Metalle, Flüssigkeitsschichten u. s. w., so bieten diese dem Durchgange der Elektrizität einen verschiedenen Widerstand. Durch eine Stelle größeren Widerstandes (dünneren Drahtes) könnte nur weniger Elektrizität fließen als durch eine Stelle geringeren Widerstandes (dickeren Drahtes). Da aber in demselben Stromkreise durch jede Stelle gleichviel Elektrizität fließen muß, so muß das Gefälle ein ungleichmäßiges sein: an dessen Stellen größeren Widerstandes muß daß Gefälle größer sein und umgekehrt; also: **das Gefälle in einem Stromkreis ist proportional den Widerständen.** Das Schema in Fig. 147 soll etwa den Verlauf eines Gefälles andeuten.

Die elektromotorische Kraft des Elementes bringt eine Potenzialdifferenz, also eine gewisse Höhe des Gefälles hervor und dies verteilt sich auf den ganzen Stromkreis proportional den Widerständen.

120. Leitungswiderstand. Rheostat und Rheochord.

Leitungswiderstand nennt man den Widerstand, welchen ein Stoff dem Durchgange der Elektrizität entgegensetzt. Man fand folgende Gesetze:

Der Leitungswiderstand ist 1) proportional der Länge, 2) umgekehrt proportional dem Querschnitte, 3) abhängig von der Natur des Stoffes. Letzteres zieht man in Rechnung, indem man einen beliebigen Stoff als Vergleichsstoff annimmt, z. B. Quecksilber, weil dies leicht chemisch rein erhalten werden kann und weil man sich durch Einfüllen in kalibrierte Glasröhren davon leicht meßbare Stücke verschaffen kann. Man vergleicht nun den Widerstand jedes Stoffes mit dem eines Quecksilberkörpers von gleicher Länge und gleichem Querschnitt, untersucht, wie vielmal der Widerstand des Stoffes größer ist als der des gleichgeformten Quecksilberkörpers, und nennt diese Zahl den spezifischen Widerstand des Stoffes.

Als Widerstandseinheit ist gebräuchlich der Widerstand einer Quecksilbersäule von 1 *m* Länge und 1 *qmm* Querschnitt bei 0° C: sie heißt die **Siemens-Einheit** = SE. In jüngster Zeit wurde das **Ohm** eingeführt, das um etwa 6 % größer ist als eine SE; 1 SE = 0,9413 Ohm. Hat also ein Kupferdraht etwa 180 *m* Länge, 1,4 *qmm* Querschnitt und einen sp. Widerstand von 0,016, so ist sein Widerstand gemäß obigen Gesetzen:

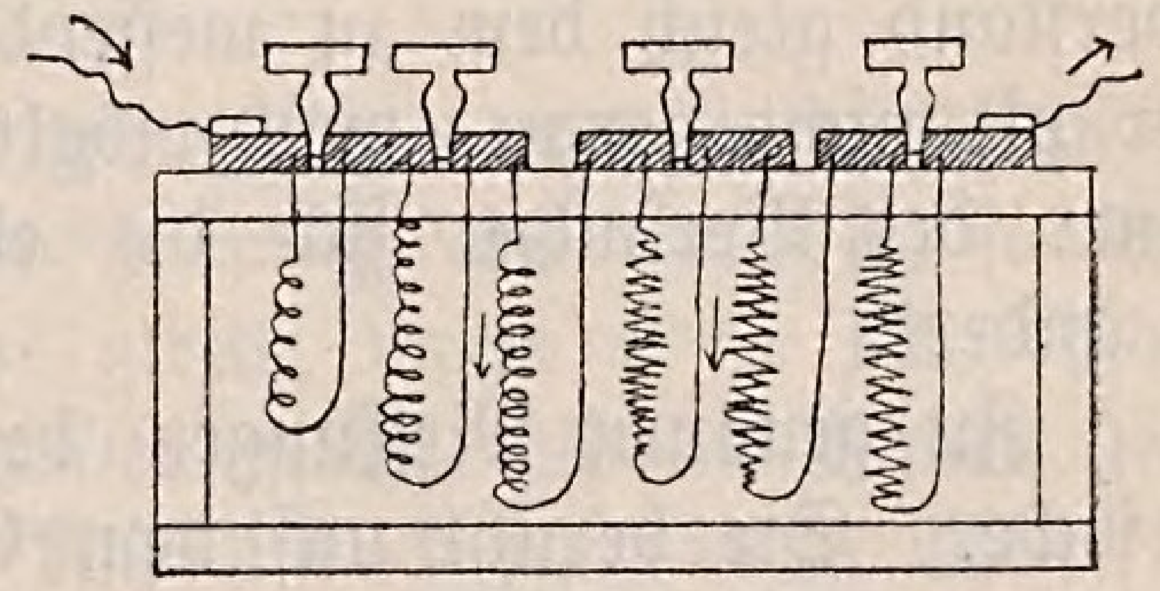
$$w = \frac{180 \cdot 0{,}016}{1{,}4} \text{ SE} = 2{,}06 \text{ SE} = 1{,}94 \text{ Ohm}.$$

Bezeichnet man allgemein die Länge in Metern mit l, den Querschnitt in *qmm* mit q, den sp. W. mit c, so ist der Widerstand $w = c \frac{l}{q}$ SE $= c \cdot \frac{l}{q}$ 0,9413 Ohm.

Rheostat.

Apparate, welche ermöglichen, eine beliebige Anzahl gemessener Widerstände in den Stromkreis einzuschalten, sind:

1) der Rheostat, z. B. der Stöpselrheostat. Auf dem Deckel eines Kästchens sind der Reihe nach mehrere Messingblöcke angebracht, durch kurze Zwischenräume getrennt. Der erste und zweite Block sind durch einen ins Innere des Kastens herabhängenden Kupferdraht verbunden, dessen Widerstand genau 1 Ohm ist. Ebenso ist der 2. und 3. Block verbunden durch einen Widerstand von 2 Ohm und so folgen Widerstände, die man = 2, 5, 10, 20, 20, 50, 100, 200, 200, 500 Ohm macht. Außerdem kann man jedes Paar benachbarter Blöcke, verbinden durch einen in ihren Zwischen-


Fig. 148.

raum eingesteckten Messingstöpsel. Man leitet durch eine Klemmschraube den Strom in den ersten Block und aus dem letzten Block heraus. Sind alle Stöpsel eingesteckt, so durchläuft der Strom nur die Blöcke und Stöpsel, ohne Widerstand. Zieht man irgend einen Stöpsel aus, so muß der Strom den Widerstand zwischen den getrennten Blöcken durchlaufen. Durch Ausziehen der Stöpsel kann man also beliebige Widerstände einschalten.

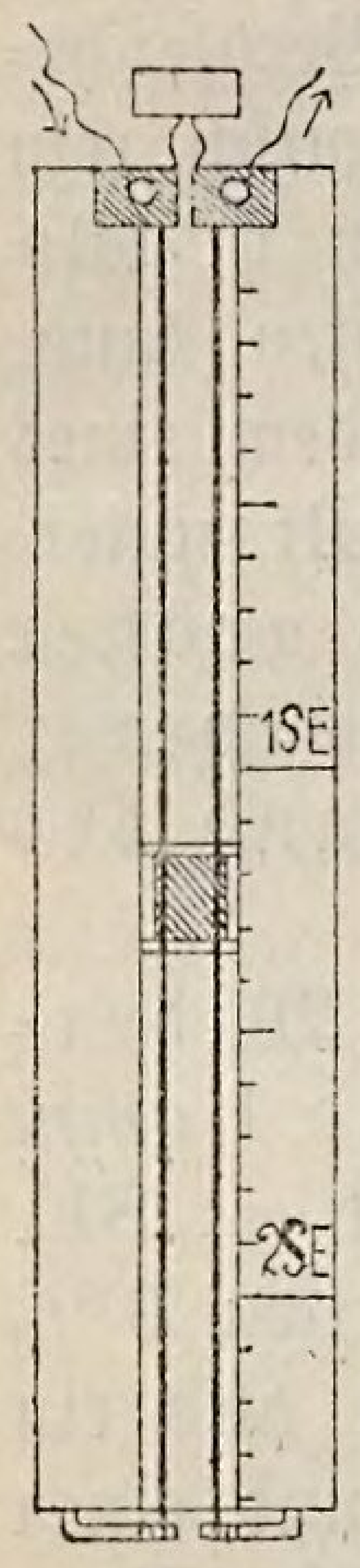


Fig. 149.

2) Das Rheochord. Zwei Messingblöcke sind auf einem Brette in geringer Entfernung befestigt. Von ihnen gehen 2 Platindrähte aus, die parallel laufend über das Brett gespannt sind. Sie laufen dabei durch ein kleines Kästchen aus Eisen, das mit Quecksilber gefüllt ist, so daß durch dieses die Drähte in leitender Verbindung stehen. Das Kästchen ist wie ein Schlitten in einer Rinne des Brettes verschiebbar. Leitet man den Strom in die Blöcke, und sind dieselben durch den Stöpsel verbunden, so ist kein Widerstand vorhanden; zieht man aber den Stöpsel aus, so muß der Strom die Stücke der Platindrähte von den Blöcken bis zum Kästchen durchlaufen. Durch Verschieben des Kästchens kann man den Widerstand verändern, und auf einer Skala neben dem Schlitten sind die Bruchteile von Widerstands-Einheiten angegeben, die diesem Widerstande gleich sind. Rheostat und Rheochord sind gewöhnlich nach „Ohm" geteilt (Ohmkasten).

121. Messung von Widerständen.

Rheostat und Rheochord dienen dazu, um in einen Stromkreis beliebige gemessene Widerstände einzuschalten; sie dienen auch insbesondere dazu, um Widerstände zu messen. Das einfachste Verfahren besteht darin, daß man in einen Stromkreis zuerst den zu messenden Widerstand, und dann so viel Rheostatwiderstand einschaltet, bis die Galvanometernadel wieder dieselbe Stellung hat, wie zuerst; dann ist der durch Ausziehen der Stöpsel eingeschaltete Rheostatwiderstand gleich dem zu messenden Widerstand. Dies Verfahren ist aber oft nicht genau, weil möglicherweise schon während der kurzen Dauer des Versuches sich die elektromotorische Kraft des Elementes ändert.

Zu genauen Messungen benützt man die Wheatstone'sche Brücke. Sie beruht auf dem Gesetz der Stromverzweigung. Findet nämlich der Strom zwei Wege, so verteilt er sich auf beide und zwar so, daß durch den Zweig mit kleinerem Widerstande ein Zweigstrom von größerer Stärke fließt: **Die Stromstärken der Zweige verhalten sich umgekehrt wie die Widerstände der Zweige.**

Sind die Widerstände der Zweige gleich, so sind auch die Ströme in beiden Zweigen gleich stark.

Die Wheatstone'sche Brücke ist folgendermaßen eingerichtet: Von dem einen Pole führt der Strom zum Stifte A und verzweigt sich dort: der eine Zweig führt zum Stifte B, von da zum Stifte C und von da zurück zum andern Pole; dabei müssen die Drähte AB und BC genau gleichen Widerstand haben. Der andere Zweig führt von A nach dem Stifte D, dieser Teil ist der zu messende Widerstand w, dann von D nach C, dieser Teil ist ein Rheostat und Rheochord. Schließlich sind die Stifte B und D durch die Brücke, das ist durch ein empfindliches Galvanometer (g) verbunden.

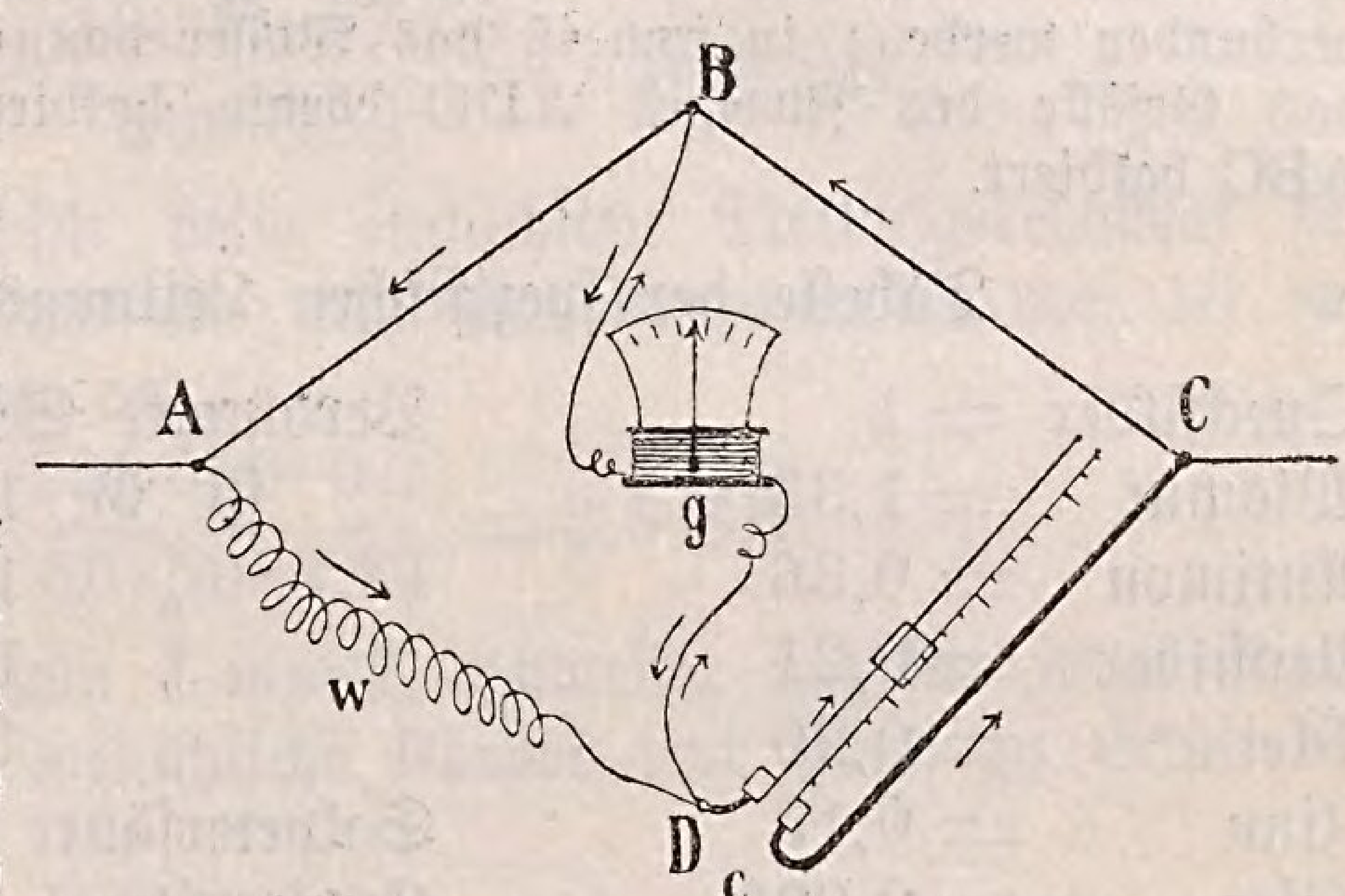


Fig. 150.*)

Es sollte eigentlich C mit C, zusammenfallen, oder man muß C' mit C durch einen so dicken Leiter verbinden, daß dessen Widerstand vernachlässigt werden kann.

Wird nun der Strom geschlossen, so bieten sich ihm zwischen A und C 4 Wege:

1) . . . . A, B, C . . . .
2) . . . . A (w) D (Rh) C . . . . . .
3) . . . . A B (g) D (Rh) C . . . . .
4) . . . . A (w) D (g) B C . . . . .

Die beiden letzten Ströme, welche beide durch das Galvanometer (g) fließen, fließen in entgegengesetzter Richtung, würden also, wenn jeder für sich da wäre, die Nadel nach entgegengesetzten Richtungen ablenken; sie lenken also die Nadel gar nicht ab, wenn sie gleich stark sind. Diese beiden Zweige haben aber folgende Widerstände.

3) Draht AB, Galvanometerwiderstand g, Rheostatwiderstand Rh, also: AB + g + Rh.

4) Eingeschalteter Widerstand w, Galvanometerwiderstand g, Draht BC, also: w + g + BC. Da g = g, BC, = AB, so sind die beiden Zweigwiderstände einander gleich, wenn w = Rh; dann sind aber auch die Zweigströme einander gleich und die Nadel steht auf 0. Schaltet man also am Rheostat so viele Widerstände ein, daß die Nadel auf 0 steht, so ist der zu

*) In Figur 150 haben die Pfeile auf AB und BC verkehrte Richtungen.

messende Widerstand w gleich dem Widerstande des Rheostaten und Rheochordes.

Dabei ist zu bemerken, daß, wenn die Nadel auf 0 steht, nicht wirklich zwei Ströme von entgegengesetzter Richtung durch das Galvanometer fließen, sondern daß in diesem Falle gar kein Strom das Galvanometer durchfließt; es ist das ebenso, wie wenn ein Wasserstrom sich in die Zweige ABC und ADC teilt und diese Zweige unterwegs durch den Kanal BD verbunden werden; in ihm ist das Wasser dann ruhig, wenn der Punkt D das Gefälle des Zweiges ADC ebenso halbiert, wie B das Gefälle des ABC halbiert.

Tabelle der spezifischen Leitungswiderstände.

Quecksilber	= 1	Verdünnte Schwefelsäure	
Wismut	= 1,33	sp. G. 1,01 . . .	131600
Antimon	= 0,36	„ 1,05 . . .	34300
Neusilber	= 0,21	„ 1,10 . . .	18400
Blei	= 0,20	„ 1,23 . . .	12600
Zinn	= 0,13	Salpetersäure	16000
Eisen	= 0,099	Kupfervitriol 2 Teile in 10 Tl. Wasser gelöst . . .	170000
Platin	= 0,092	Zinkvitriol 3 Tl. in 10 Tl. Wasser gelöst	220000
Zink	= 0,057	Kochsalzlösung gesättigt . .	57000
Messing	= 0,051	Wasser	14000000
Gold	= 0,021	Graphit	17,7
Kupfer	= 0,016	Gaskohle	32,6
Silber	= 0,015		

Bei wachsender Temperatur nimmt der Widerstand bei Metallen zu, bei Flüssigkeiten ab.

Da unter den billigen Metallen Kupfer den geringsten Widerstand hat, so wird es zu kurzen Leitungen, Multiplikatorwindungen rc. stets verwendet. Bei langen Leitungen (Telegraph) benützt man Eisen, das jedoch einen 6mal größeren Widerstand hat (6mal schlechter leitet). Das Leitungsvermögen der Metalle für Elektrizität ist annähernd proportional dem für Wärme. Verunreinigung oder Legieren der Metalle erhöht im allgemeinen ihren Widerstand beträchtlich (Messing). Flüssigkeiten (außer Quecksilber) haben alle einen viel größeren, reines Wasser hat einen ungemein hohen Widerstand. Bei chemisch reinem Wasser hat man sogar einen so hohen Widerstand gefunden, daß man im Zweifel ist, ob es die Elektrizität überhaupt leitet. Löst man im Wasser Salze auf, oder vermischt es mit Säuren, so wird sein Widerstand beträchtlich kleiner, bei Schwefelsäure mehr als tausendmal. Doch haben nicht gerade die konzentrierten Lösungen den kleinsten Widerstand; so hat z. B. Kochsalzlösung bei 30 *g* Salz auf 100 *g* Wasser, Schwefelsäure bei 13 Äquivalenten H_2O auf ein SO_4 H_2 (sp. G. 1,23) den geringsten Widerstand; sowohl schwächere als konzen-

triertere Mischungen haben größeren Widerstand. Sollen Flüssigkeitsschichten einen geringen Widerstand haben, so müssen sie kurz sein und großen Querschnitt haben. Z. B. die Schwefelsäureschichte in einem Grove'schen Element bei 1 *cm* Länge (Abstand der Zinkplatte vom Diaphragma) und 20 *cm* Breite (der Zinkplatte) und 15 *cm* Tiefe (des Eintauchens) hat einen Widerstand:

$$W = \frac{cl}{q} = \frac{18000 \cdot 0{,}01}{200 \cdot 150} = 0{,}006 \text{ SE.}$$

Die Zinkvitriolschichte beim einfachsten Meidingerelement bei einer Länge (Höhe) von 10 *cm* und Becherdurchmesser von 10 *cm* hat einen Widerstand von ca.

$$W = \frac{220\,000 \cdot 0{,}1}{50 \cdot 50 \cdot 3{,}14} = 2{,}8 \text{ SE.}$$

Telegraphendraht von 4 *mm* Durchmesser hat für jedes Kilometer ca. 8 Ohm, der menschliche Körper von Hand zu Hand ca. 1000 Ohm Widerstand.

122. Ohm'sche Gesetze über die Stromstärke. (1827.)

Die von einem Elemente hervorgebrachte Stromstärke hängt ab von der elektromotorischen Kraft und vom Widerstande, und zwar: **die Stromstärke ist dierekt proportional der elektromotorischen Kraft und umgekehrt proportional dem Widerstande.** (Ohmsches Gesetz.)

Als Einheit der elektromotorischen Kraft oder der durch die elektromotorische Kraft hervorgebrachten Potenzialdifferenz nimmt man das Volt (abgekürzt aus Volta), das ist eine elektromotorische Kraft, die um ca. 5 % geringer ist, als die eines Daniell-Elementes. **Die Stromeinheit ist 1 Ampère, d. h. derjenige Strom, den die Einheit der elektromotorischen Kraft, also 1 Volt liefert, wenn der Widerstand auch eine Einheit, also 1 Ohm beträgt kurz:**

1 Volt liefert in 1 Ohm 1 Ampère. Bezeichnet man die Stromstärke mit J, die elektromotorische Kraft mit E, den Widerstand mit W, so ist: $J = \frac{E}{W}$ oder $\text{Amp.} = \frac{\text{Volt}}{\text{Ohm}}$. Unter Widerstand ist der gesamte Widerstand zu verstehen, also nicht bloß der äußere Widerstand a von Pol zu Pol, sondern auch der innere Widerstand i, welchen die Flüssigkeitsgeschichte zwischen den beiden Polplatten bietet.

Von den gebräuchlichsten Elementen haben:

	Elektromot. Kraft.	Inneren Widerstand.
Meidinger . . .	0,95 Volt	9—10 Ohm.
Daniell	1,06 „	2— 5 „
Leclanché	1,48 „	2 „
Grove und Bunsen .	1,81 „	0,25 „

Um starke Ströme zu bekommen, muß man beide Widerstände klein machen, den innern dadurch, daß man die Platten groß macht, nahe an einander bringt, tief eintaucht und Flüssigkeiten von geringem sp. Widerstand anwendet, den äußeren dadurch, daß man kurzen und dicken Schließungsdraht anwendet. Ist der äußere Widerstand von selbst schon groß, etwa 1000 Ohm, also ein langer dünner Draht, den man nicht verkürzen kann, so ist der Strom schwach und es macht dann wenig Unterschied, ob der innere Widerstand klein (0,1) oder verhältnißmäßig groß ist (1 oder 4).

Wenn man gleich von den Polklemmen Zweigdrähte zu einem Galvanometer leitet, dessen Widerstand vielmal größer ist, als der äußere Widerstand des Stromkreises, so fließt durch das Galvanometer ein Zweigstrom von geringer Stärke; seine Stärke ist bloß abhängig von der an den Polen vorhandenen Potenzialdifferenz; deshalb kann letztere durch den Ausschlag der Galvanometernadel erkannt werden. Man richtet die Kreisteilung dabei meist so ein, daß sie die Potenzialdifferenz direkt in Volts angibt und nennt einen solchen Apparat Voltmeter. Er gibt aber nicht die ganze, durch die elektromotorische Kraft des Elements erzeugte Potenzialdifferenz an, da ein Teil der letzteren durch das in der Flüssigkeit liegende Gefälle schon verbraucht ist. Er gibt nur die noch zwischen den Polklemmen vorhandene Potenzialdifferenz. Aber gerade diese enthält den Teil des Gefälles, der in der praktischen Anwendung ausgenützt werden kann; deshalb wird sie häufig gemessen und als Polspannung oder Klemmspannung bezeichnet.

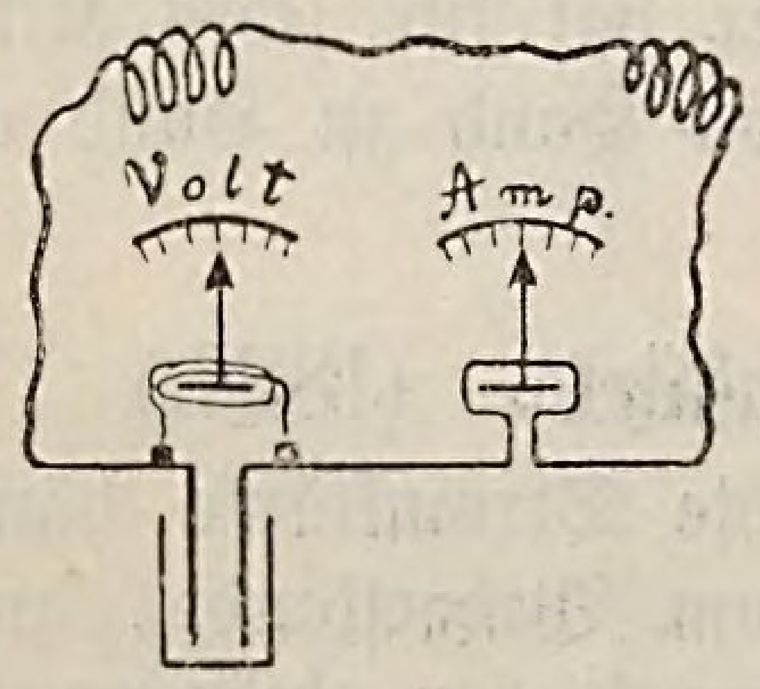


Fig. 151.

Schaltet man irgendwo in den äußeren Stromkreis ein Galvanometer ein mit so geringem Widerstand, daß dadurch der Gesamtwiderstand des Stromkreises nur unmerklich verändert wird, so kann durch den Ausschlag dieser Galvanometernadel die im Stromkreis vorhandene Stromstärke erkannt werden: ein solcher Apparat heißt Ampèremeter.

123. Galvanische Batterie.

Genügt ein Element nicht, um eine gewünschte Stromstärke herzustellen, so nimmt man deren mehrere und verbindet sie zu einer Batterie, was auf dreierlei Arten geschehen kann.

1) Verbindung auf elektromotorische Kraft, Verbindung der ungleichnamigen Pole, auch Verbindung auf Intensität oder Spannung genannt. Man läßt den + Pol des

ersten Elementes frei und verbindet seinen — Pol mit dem + Pole des zweiten, den — Pol des zweiten mit dem + Pol des dritten u. s. f., bis der — Pol des letzten frei übrig bleibt. Die freien Pole der äußersten Elemente sind die Pole der Batterie. Auch hiefür

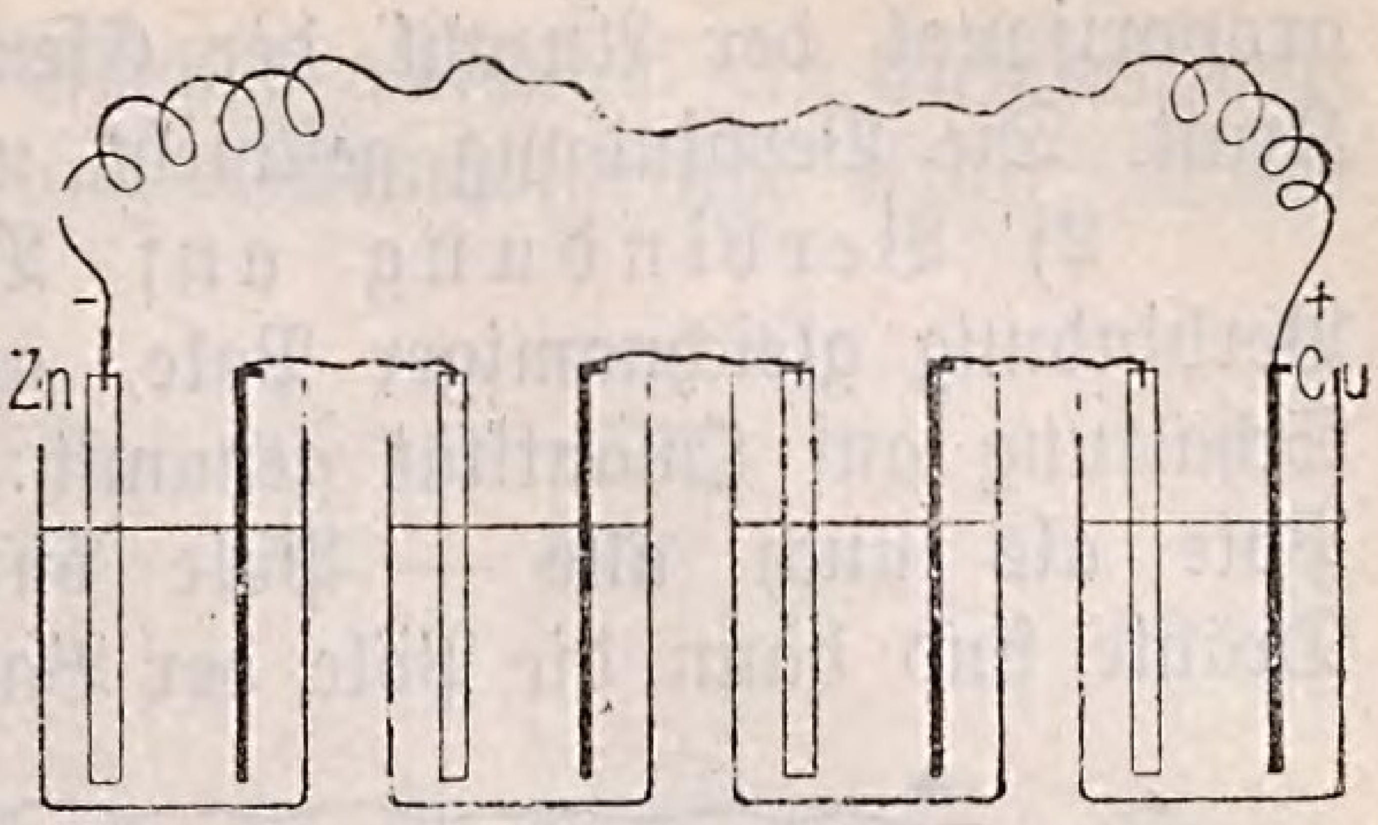


Fig. 152.

gilt das Ohmsche Gesetz $J = \frac{E}{W}$, jedoch ist unter der E die Summe aller elektromotorischen Kräfte der einzelnen Elemente zu verstehen; wenn man also n gleiche Elemente von der elektromotorischen Kraft e nimmt, so ist $E = ne$; unter dem Widerstande ist zu verstehen der äußere Widerstand a und die Summe sämmtlicher innerer Widerstände; ist der innere Widerstand eines Elementes $= i$, so ist bei n gleichen Elementen $W = a + ni$.

Die Stromstärke einer Batterie von n gleichen Elementen ist also $J = \frac{ne}{a + ni}$.

Vergleichen wir diese Stromstärke mit der eines einzigen Elementes, so finden wir: die Zusammenstellung einer Batterie verstärkt den Strom nicht (oder nicht viel), wenn der innere Widerstand groß ist im Verhältnis zum äußeren. Ist z. B. bei einem Meidinger-Element $i = 12$, $a = 0{,}01$, so ist bei einem Elemente

$$J = \frac{e}{0{,}01 + 12}, \text{ bei 10 Elementen } J = \frac{10 \cdot e}{0{,}01 + 120}.$$

Da hiebei der Nenner auch nahezu 10 mal größer geworden ist, so ist der Wert des Bruches, also die Stromstärke nahezu gleichgroß geblieben.

Die Zusammenstellung einer Batterie verstärkt den Strom bedeutend, wenn der innere Widerstand klein ist im Verhältnis zum äußeren. Ist z. B. bei einem Meidinger-Element $i = 12$, $a = 100$, so ist bei einem Elemente

$$J = \frac{e}{100 + 12}, \text{ bei 10 Elementen } J = \frac{10e}{100 + 120},$$

der Nenner hat sich nicht beträchtlich vergrößert, blos ca. 2 mal, aber der Zähler ist 10mal größer geworden, somit ist der Bruch nahezu 5 mal größer geworden.

Bei großem äußeren Widerstande macht man also Zusammenstellung auf elektromotorische Kraft; die Stromstärke ist, wenn der innere Widerstand sehr klein ist im Verhältnis zum äußeren, nahezu

proportional der Anzahl der Elemente oder der elektromotorischen Kraft. Die Verbindung geschieht nach dem Schema von Fig. 152.

2) *Verbindung auf Widerstandsverminderung*, Verbindung gleichnamiger Pole, auch *Parallelschaltung* oder Schaltung auf Quantität genannt: Man verbindet sowohl alle + Pole als auch alle — Pole durch je einen Draht, diese beiden Drähte sind dann die Pole der Batterie; verbindet man sie irgendwo unter sich, so ist der Strom geschlossen. Es schaut dann so aus, als wären alle Zinkplatten zu einer einzigen Platte verbunden und ebenso alle Kupfer= (oder +) Platten.

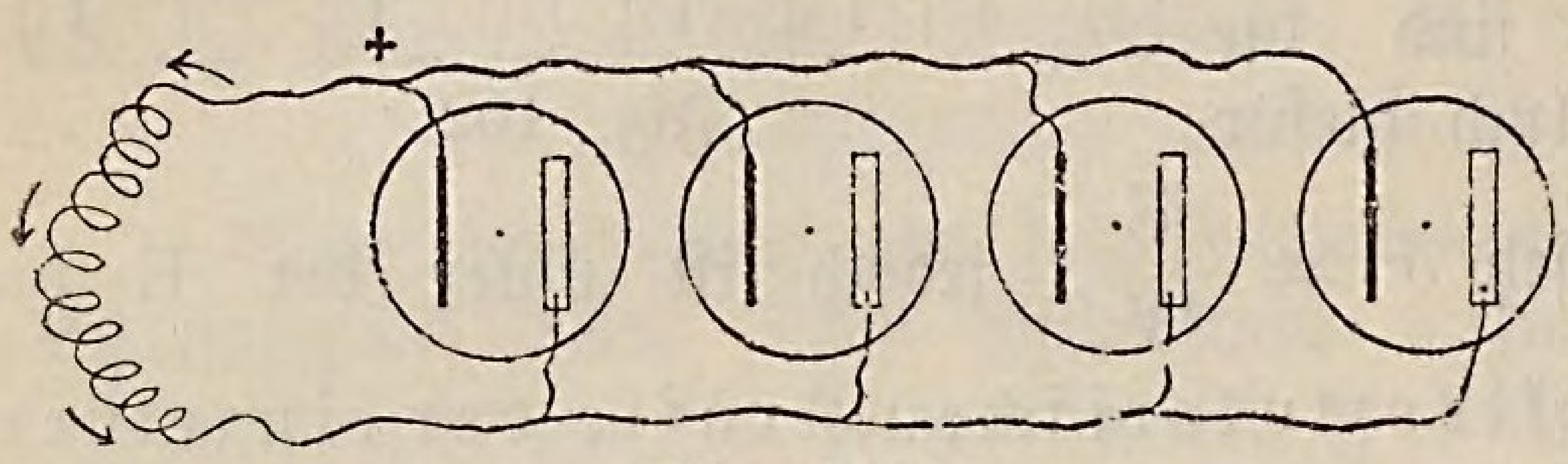


Fig. 153.

Es gilt dasselbe Ohmsche Gesetz: dabei ist die *elektromotorische Kraft dieselbe, wie bei einem Elemente*, aber der *innere Widerstand ist kleiner*; denn während er bei *einem* Elemente aus dem Widerstande i der zwischen beiden Platten liegenden Flüssigkeitsschichte besteht, ist bei n Elementen diese Flüssigkeitsschichte n mal breiter, der Querschnitt der Flüssigkeitsschichte n mal größer, der Widerstand n mal kleiner, also $\frac{i}{n}$; demnach die Stromstärke

$$J = \frac{e}{a + \frac{i}{n}}$$

Diese Zusammenstellung ist von Nutzen, wenn der innere Widerstand groß ist im Verhältnis zum äußeren; ist z. B. bei einem Daniell=Elemente a = 0,01 i = 2, so ist bei einem Elemente

$$J = \frac{e}{0{,}01 + 2}, \text{ bei 10 Elementen } J = \frac{e}{0{,}1 + 0{,}2}$$

Der Nenner ist fast 10 mal kleiner, somit die Stromstärke fast 10 mal größer geworden; es ist gerade so, als hätte ich ein Element von 10 mal größeren Platten genommen.

Die Zusammenstellung hilft nichts oder nicht viel, wenn der innere Widerstand im Verhältnis zum äußeren klein ist. Ist z. B. bei einem Daniell=Element a = 100, i = 2, so ist bei *einem* Elemente $J = \frac{e}{100 + 2}$, bei 10 Elementen $J = \frac{e}{100 + 0{,}2}$; der Nenner und somit der Bruch hat sich fast gar nicht geändert.

3) *Gemischte Schaltung.* Man teilt die vorhandenen Elemente, z. B. 15, in Gruppen von je gleich viel Elementen, z. B. je 3, also 6 Gruppen, schaltet die Elemente jeder Gruppe unter

sich auf Quantität, so stellt jede Gruppe gleichsam ein Element vor, und verbindet die Gruppen nun auf elektromotorische Kraft. Siehe das Schema Fig. 154.

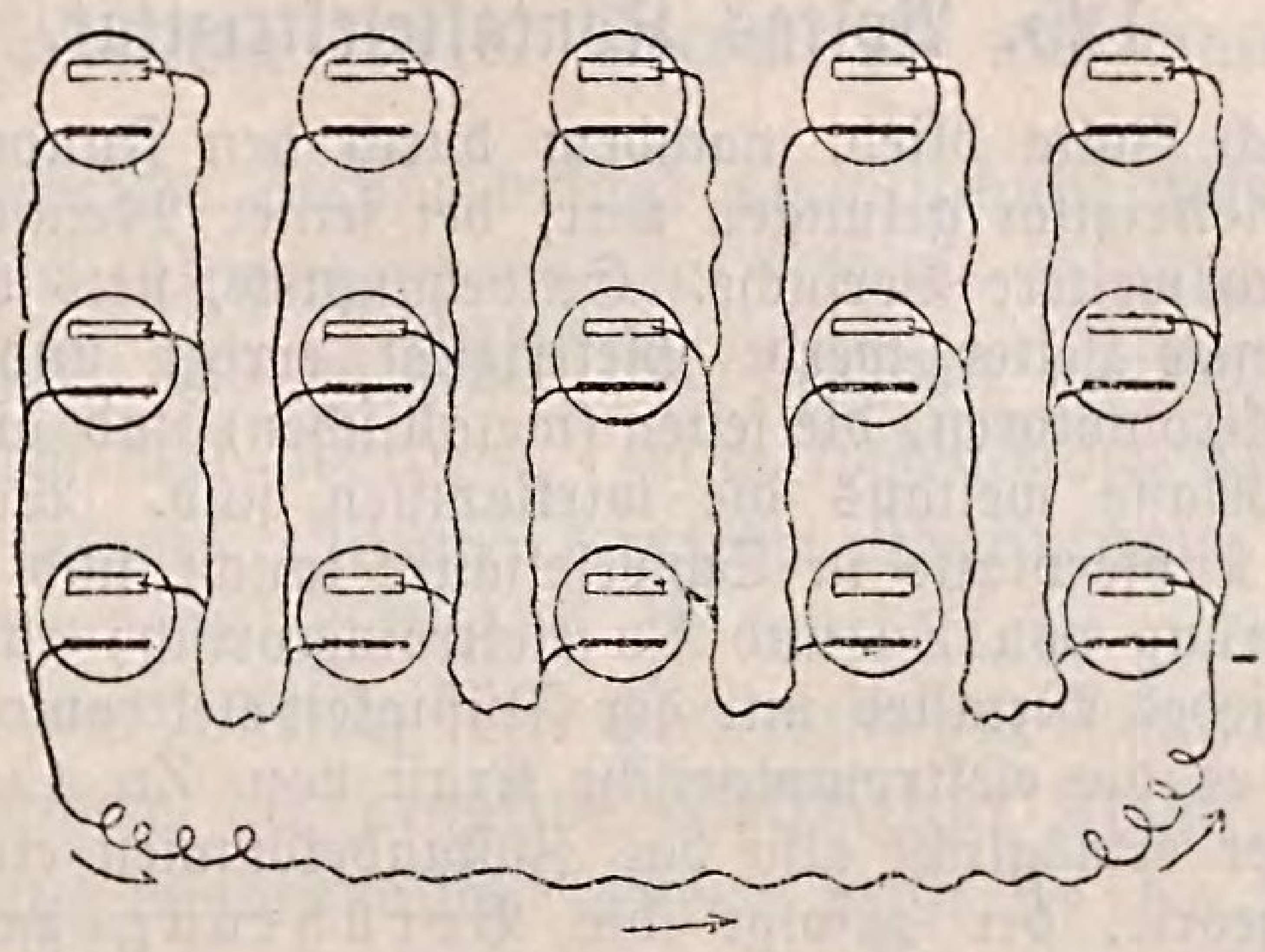


Fig. 154.

Das Ohmsche Gesetz hat dieselbe Form, also ist bei n Gruppen à m Elementen die Stromstärke

$$J = \frac{ne}{a + \frac{ni}{m}} = \frac{5e}{a + \frac{5i}{3}}.$$

Man kann nach Belieben mehr oder weniger Gruppen bilden, doch liefert in jedem besonderen Falle gerade diejenige Schaltung den stärksten Strom, bei welcher der innere Widerstand gleich dem äußeren ist.

124. Galvanis Grundversuch.

Der Entdecker der galvanischen Elektrizität, Galvani, fand (1789), daß ein frisch abgeschnittener Froschschenkel Zuckungen macht, wenn man den Funken einer Leydener Flasche durchgehen läßt und daß eben solche Zuckungen zum Vorschein kamen, als der Froschschenkel mit einem kupfernen Haken an einem eisernen Gitter hing und durch den Wind an die Stäbe des Gitters anschlug. Indem er die Bedingungen dieses „Froschexperiments" untersuchte, wurde er der Entdecker der nach ihm benannten Elektrizität. Er deutete die Erscheinung jedoch nicht richtig und erst Volta behauptete 1794, daß durch Berührung zweier verschiedener Metalle Elektrizität erzeugt werde. Wenn man nämlich eine Zink- und eine Kupferplatte mit isolierenden Handgriffen (aus Glas) versieht, aneinander drückt und wieder von einander entfernt, so zeigen beide Platten am Kondensationselektroskop Elektrizität. Volta behauptete, die Elektrizität sei nur durch die Berührung der zwei verschiedenen Metalle entstanden und nannte sie deshalb auch Berührungs- oder Kontaktelektrizität. Dieser Versuch war der Fundamentalversuch der galvanischen Elektrizität (1800). Das Zucken des Froschschenkels kommt, meinte Volta, davon her, daß die getrennten Elektrizitäten sich durch den Froschschenkel ausgleichen. Dieser Erklärung schloß sich Galvani nicht an, da sich fand, daß die Zuckungen auch eintreten, wenn nur ein Metall, ja wenn nur ein feuchter Leiter verhanden war; deshalb blieb Galvani bei seiner Ansicht stehen, daß hier tierische Elektrizität vorhanden sei, wovon die eine Art Elektrizität in den Nerven, die andere in den Muskeln sei, und daß der Leiter, der beide berührt, bloß den Ausgleich beider Elektrizitäten er-

möglicht, und so die Zuckung verursacht. In der That gibt es eine **tierische** Elektrizität, die auf ähnliche Weise im tierischen Organismus vorhanden ist und Galvani wurde so zugleich der Entdecker der tierischen Elektrizität.

125. Voltas Kontaktelektrizität.

Aber auch Volta blieb, nachdem durch den Fundamentalversuch der Nachweis der Elektrizität gelungen war, bei seiner Meinung stehen und bekräftigte sie durch weitere Versuche. Er behauptete, stets bei der Berührung zweier verschiedener Leiter werde Elektrizität erregt und unterschied zwei Klassen von Elektromotoren, die festen (metallischen) und die flüssigen, wovon die der ersten Klasse weitaus die wirksamsten sind. Wenn man also eine Zink- und eine Kupferplatte in Schwefelsäure taucht und oben verbindet, so wirkt die Berührung von Zn und Cu elektromotorisch; allerdings wirkt auch die Berührung jedes Metalles mit der Flüssigkeit elektromotorisch, jedoch sehr schwach, so daß es die elektromotorische Kraft von Zn Cu wenig schwächt; der flüssige Leiter ermöglicht also das Zustandekommen eines Stromes.

Diese Theorie, der zufolge die **Berührung** zweier verschiedener Metalle elektromotorisch wirkt, wird die **Kontakttheorie** genannt; sie wurde von Volta und seinen Anhängern weiter ausgebildet und auf einen hohen Stand der Vollkommenheit gebracht, so daß sämtliche Erscheinungen und Gesetze des Stromes durch dieselbe erklärt werden konnten.

Dieser Theorie gegenüber steht die „**chemische Theorie**“, wie wir sie bisher entwickelt haben. Ihr zufolge entsteht die Elektrizität durch Berührung heterogener (stofflich verschiedener) Körper infolge chemischer Einwirkung der beiden Körper aufeinander und als Ersatz für die Wärme, welche beim chemischen Prozeß zum Vorschein kommen sollte, aber nicht zum Vorschein kommt.

Der Haupteinwurf, welcher der Kontakttheorie gemacht wird, ist nämlich der, daß durch Berührung allein Elektrizität erzeugt werden soll; Elektrizität ist aber Kraft und kann deshalb nicht aus nichts entstehen, sondern nur dadurch daß eine gewisse Arbeit aufgewendet wird. Berührung ist aber keine Arbeit; wohl aber wird bei einer chemischen Verbindung Arbeit (Wärme) frei und diese wird in Elektrizität verwandelt.

126. Die Voltasche Säule.

Im Verfolg seiner Untersuchungen kam Volta zur Konstruktion der berühmten **Voltaschen Säule** 1800. Nimmt man eine Zink- und eine Kupferscheibe (etwa thalergroß) und legt zwischen beide eine Tuch- oder eine Filzscheibe, die mit Salzwasser oder verdünnter Schwefelsäure getränkt ist, so stellt diese Zusammenstellung ähnlich wie bei der Zambonischen Säule ein Element dar. Schichtet man nun mehrere solche Elemente über einander auf, so daß jede Kupferplatte eines vorhergehenden Elementes von der Zinkplatte des folgenden berührt wird (ähnlich wie bei der trockenen Säule), so hat man die Voltasche Säule. Fig. 155.

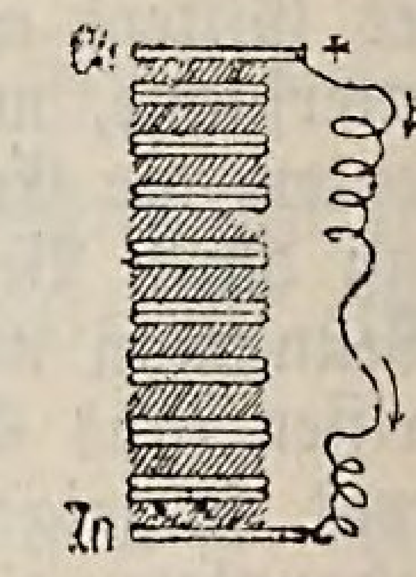


Fig. 155.

Die Säule stellt eine auf elektromotorische Kraft geschaltete Batterie von vielen Elementen dar. Mit ihr wurden die ersten Untersuchungen über galvanische Elektrizität angestellt und wesentliche Eigenschaften und Wirkungen des galvanischen Stromes entdeckt. Der Aufbau der Säule ist aber mühselig, da die Metallscheiben stets blank geputzt werden müssen; zudem ist der Strom nur kurze Zeit nach dem Aufbaue kräftig, nimmt rasch ab (wenn die geringe Menge Flüssigkeit in den Filzscheiben verbraucht ist) und hört bald ganz auf; zur praktischen Verwendung ist sie ganz untauglich. Sie ist des-

halb bald verdrängt worden durch die galvanischen Elemente und Batterien, und schon Volta stellte einen Becher oder Tassenapparat zusammen, die ursprünglichste Form unserer heutigen galvanischen Batterien.

127. Wirkung zweier Stromteile auf einander.

Der galvanische Strom bringt mannigfache Wirkungen hervor, die im folgenden besprochen werden. Diese Wirkungen sind höchst eigentümlicher Art, und es fehlt uns bei den meisten die Kenntnis, wie sie hervorgebracht werden. Eine wesentliche Eigenschaft haben aber alle gemeinsam: Wenn wir bei Betrachtung der Ohmschen Gesetze den Stromkreis gleichsam in zwei Teile geteilt haben, den Teil, in welchem die positive, freie Elektrizität vorhanden ist und fließt, und den, in welchem die negative Elektrizität fließt, so können wir nun diese Abteilung wieder fallen lassen; denn beide Teile unterscheiden sich in ihren Wirkungen in gar nichts von einander. Es ist ganz gleichgültig, ob die positive Elektrizität von rechts oder die negative von links durch den Draht läuft; teilt man dem Elemente mitsamt dem ganzen Stromkreise etwa durch die Elektrisiermaschine eine gewisse Menge positiver Elektrizität mit, so ist im ganzen Stromkreise keine negative Elektrizität vorhanden, sondern nur ungleich verteilte positive Elektrizität; die Stromstärke und Stromwirkung bleibt genau dieselbe. Nicht das Vorhandensein der freien Elektrizität verursacht die Stromwirkung, sondern das durch die ungleichmäßige Verteilung also durch das Gefälle hervorgebrachte Fließen der Elektrizität bringt die Wirkung hervor.

Man betrachtet also den ganzen Stromkreis als einen einzigen Strom und ist übereingekommen, unter „Richtung des Stromes“ diejenige Richtung zu verstehen, in welcher die positive Elektrizität fließt.

Auch die Ausgleichstelle ist durch keinerlei besondere Wirkung ausgezeichnet.

Ampères Gesetze: **Zwei parallele und gleich gerichtete Ströme ziehen sich an, zwei parallele und entgegengesetzt gerichtete Ströme stoßen sich ab, zwei gekreuzte Ströme suchen sich so zu drehen, daß sie parallel und gleichgerichtet sind.**

Zum Beweise bedient man sich des Ampèreschen Gestelles, das oben ein Stahlnäpfchen mit Quecksilber und eine um dieses herumlaufende Rinne mit Quecksilber trägt, in beide Quecksilbermassen werden die Poldrähte einer Batterie geleitet. Man hat nun einen in Form eines Rechteckes gebogenen Draht, dessen Enden in der Mitte der unteren Seite sich befinden und dort zwei nach abwärts gerichtete Stahlspitzen haben; mit der einen steht das Rechteck im Näpfchen und mit der anderen berührt es das

Quecksilber der Rinne; zwei ziemlich tief angebrachte Gewichte P und P bewirken, daß das Rechteck stabil auf der einen Spitze steht; es kann sich deshalb um diese Spitze leicht drehen, während die andere stets das Quecksilber der Rinne berührt; es fließt deshalb der Strom durch dieses leicht drehbare Rechteck.

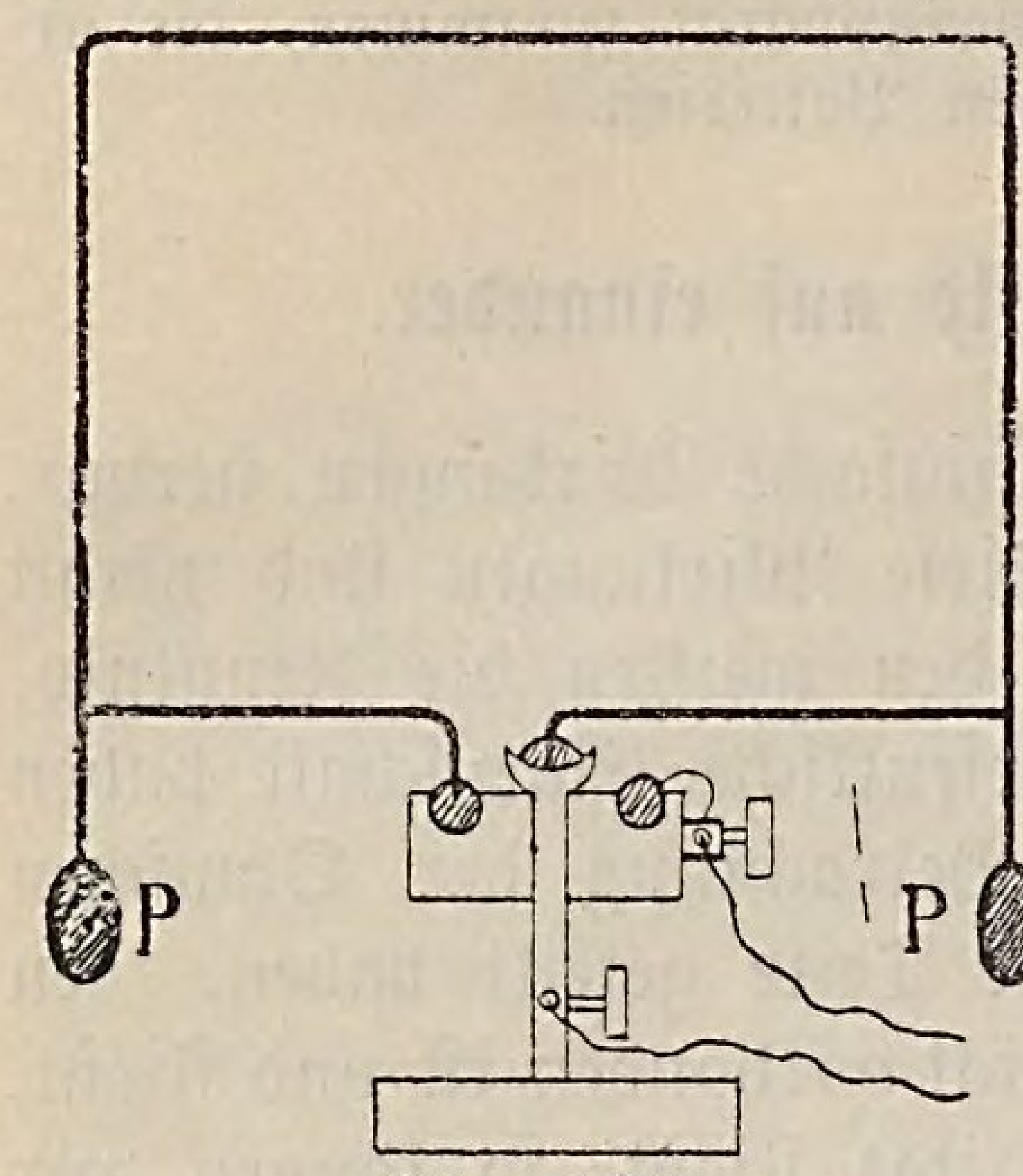


Fig. 156.

Leitet man einen Stromteil parallel einer vertikalen Seite des Rechteckes vorbei, so wird die Seite angezogen oder abgestoßen, also das Viereck gedreht, je nachdem die Ströme gleich oder entgegengesetzt sind. Hält man einen Stromteil gekreuzt über die obere Seite des Rechteckes, so erkennt man, daß das Rechteck sich dreht, bis beide Ströme gleich gerichtet parallel sind. Damit sind die Ampèreschen Gesetze erwiesen.

Betrachtet man hiebei die Stromteile bis zum Kreuzungspunkte, Fig. 157, so sieht man, daß BA und DA sich anziehen, ebenso AE und AC, daß dagegen die Stromteile AB und AE sich abstoßen, ebenso DA und AC. Man kann also auch sagen: Zwei sich kreuzende Stromteile ziehen sich an, wenn sie beide zum Kreuzungspunkte hin- oder beide von ihm weglaufen; zwei solche Ströme stoßen sich aber ab, wenn der eine zum Kreuzungspunkte hin- der andere davon wegläuft.

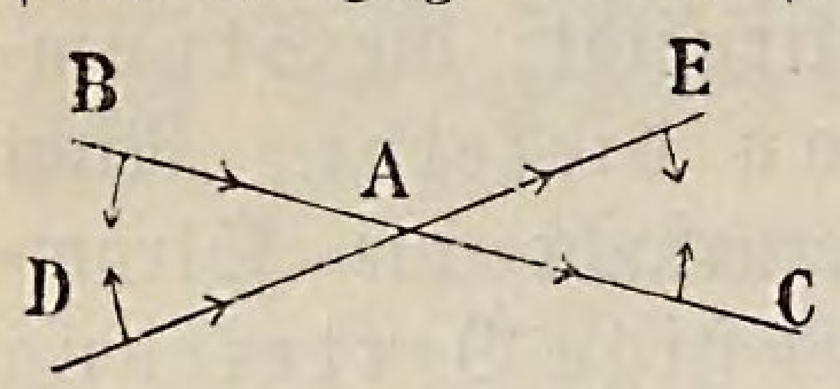


Fig. 157.

Daraus ergibt sich eine wichtige Folgerung: es sei BAC (Fig. 158) ein Strom und DE ein Stromteil, der so auf ihn zufließt, daß er ihn in A kreuzen würde, so ziehen sich BA und DE an mit einer Kraft, deren Größe und Richtung in P gezeichnet ist; aber AC und DE stoßen sich ab mit einer Kraft P′. P und P′ geben nach dem Satze vom Kräfteparallelogramm eine Resultierende R, welche also den Leiter DE zu bewegen sucht in einer Richtung, die der Stromrichtung BAC entgegengesetzt ist. Ist also etwa DE um D drehbar, so muß sich E nach links (unserer Zeichnung gemäß) drehen.

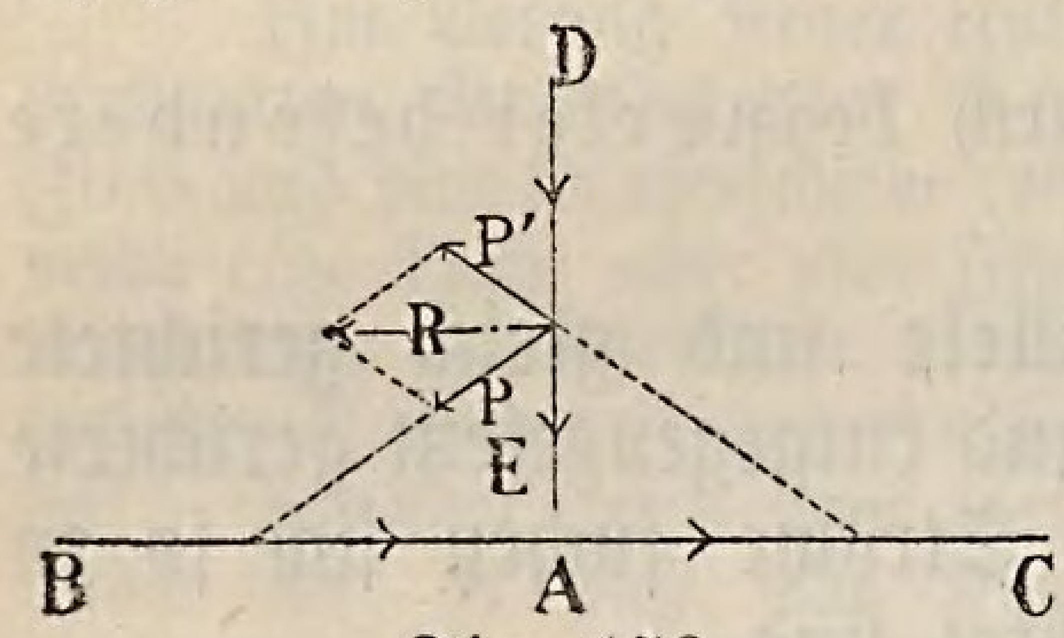


Fig. 158.

Man hat Apparate konstruiert, in denen ein Stromteil durch einen kreuzenden Strom in kontinuierliche Drehung versetzt wird; doch fehlt ihnen praktische Anwendung.

Die anziehende und abstoßende Wirkung zweier Stromteile

nimmt mit der Entfernung rasch ab, sie nimmt ab wie das Quadrat der Entfernung zunimmt.

128. Der Erdstrom.

Ist das Rechteck auf dem Ampère'schen Gestelle aufgestellt und von einem Strome durchflossen, so bleibt es nicht in jeder Lage ruhig, sondern dreht sich, bis es (nach einigen Schwingungen) so steht, daß der Strom in der unteren Seite von Ost nach West läuft, genauer, in einer Richtung, welche zur Richtung der Magnetnadel senkrecht steht. Man schließt, daß in der Erde selbst ein Strom verläuft in der Richtung von Ost nach West, senkrecht zur Richtung der Magnetnadel, und nennt diesen Strom den Erdstrom.

Diese Einwirkung des Erdstromes auf das bewegliche Rechteck wäre am einfachsten so zu erklären, daß man sagt: Der von O nach W laufende Erdstrom dreht den zu ihm gekreuzten Stromteil JF (Fig. 159) und damit das Rechteck so, daß der Strom in JF parallel und gleich gerichtet OW wird; aber der Erdstrom wirkt auch auf den in der oberen Seite des Rechteckes fließenden Strom SN und sucht ihn und damit das Rechteck nach entgegengesetzter Richtung zu drehen. Hat der das Rechteck kreuzende Strom nur eine mäßige Entfernung von ihm, so ist die Wirkung des kreuzenden Stromes auf die nähere Seite stärker als auf die entferntere, und das Rechteck dreht sich in der Richtung der größeren Kraft. Den Erdstrom müssen wir aber als verhältnismäßig weit entfernt annehmen, so daß er von FJ und NS gleichweit entfernt ist; deshalb sind beide Kräfte gleich und heben sich auf.

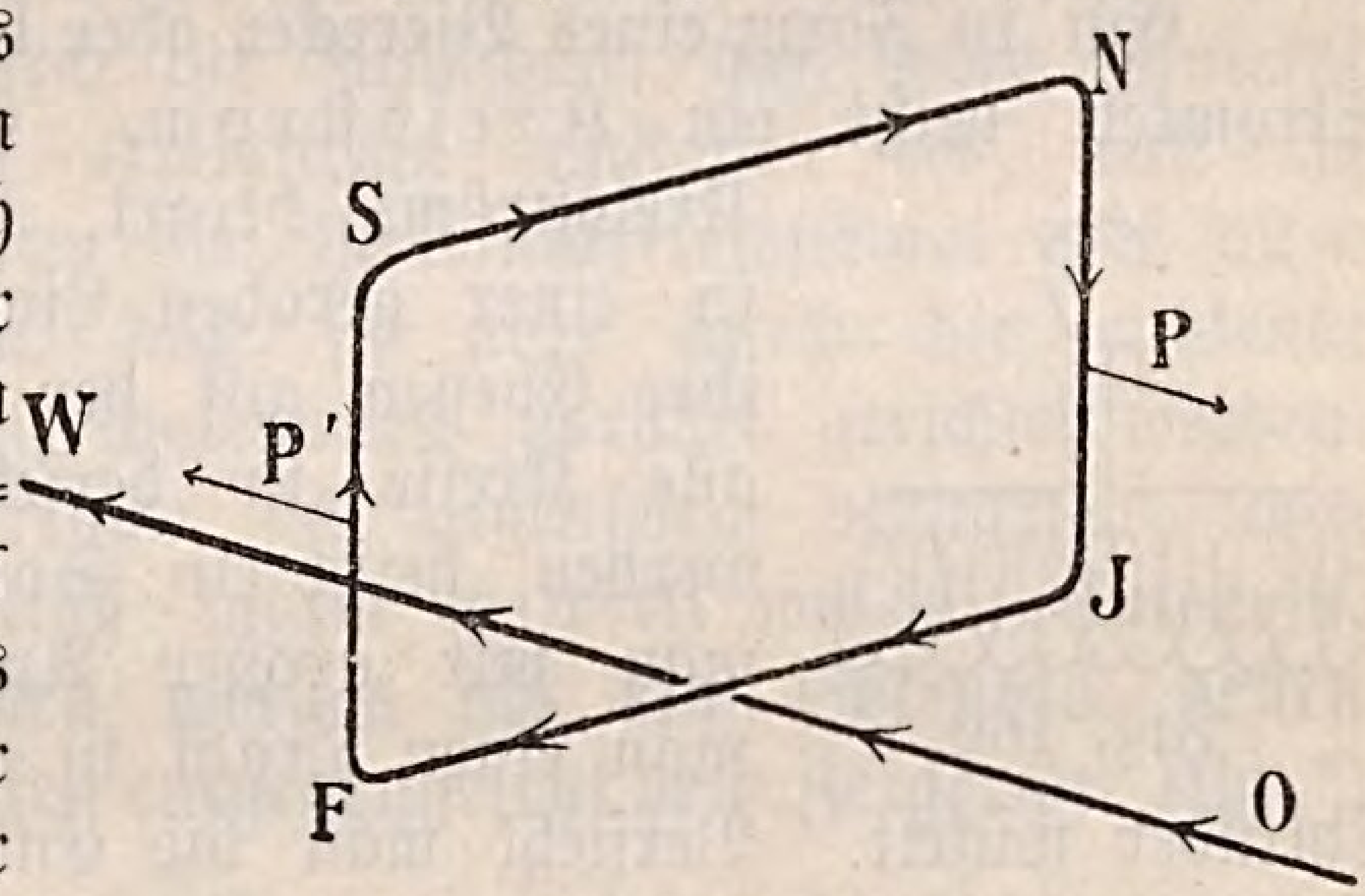


Fig. 159.

Betrachten wir aber den Stromteil NJ, so wirkt auf ihn der Erdstrom ziehend in der Richtung P (Osten), und auf den Stromteil FS wirkt er ziehend in der Richtung P' (Westen); beide suchen also das um die vertikale Achse drehbare, von N nach S gerichtete Rechteck so zu drehen, daß der Nordpunkt N nach Osten, der Südpunkt S nach Westen geht. Nach dieser Drehung fließt der Strom in der unteren Seite des Rechteckes von Osten nach Westen.

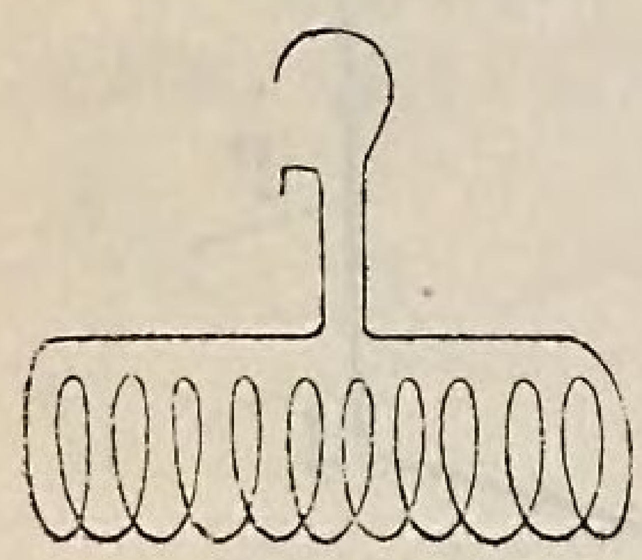
Man muß also annehmen, daß die ganze Erde beständig von einem elektrischen Strome umflossen wird, den man den Erdstrom nennt, und dessen Richtung überall senkrecht zur freischwebenden Magnetnadel steht.

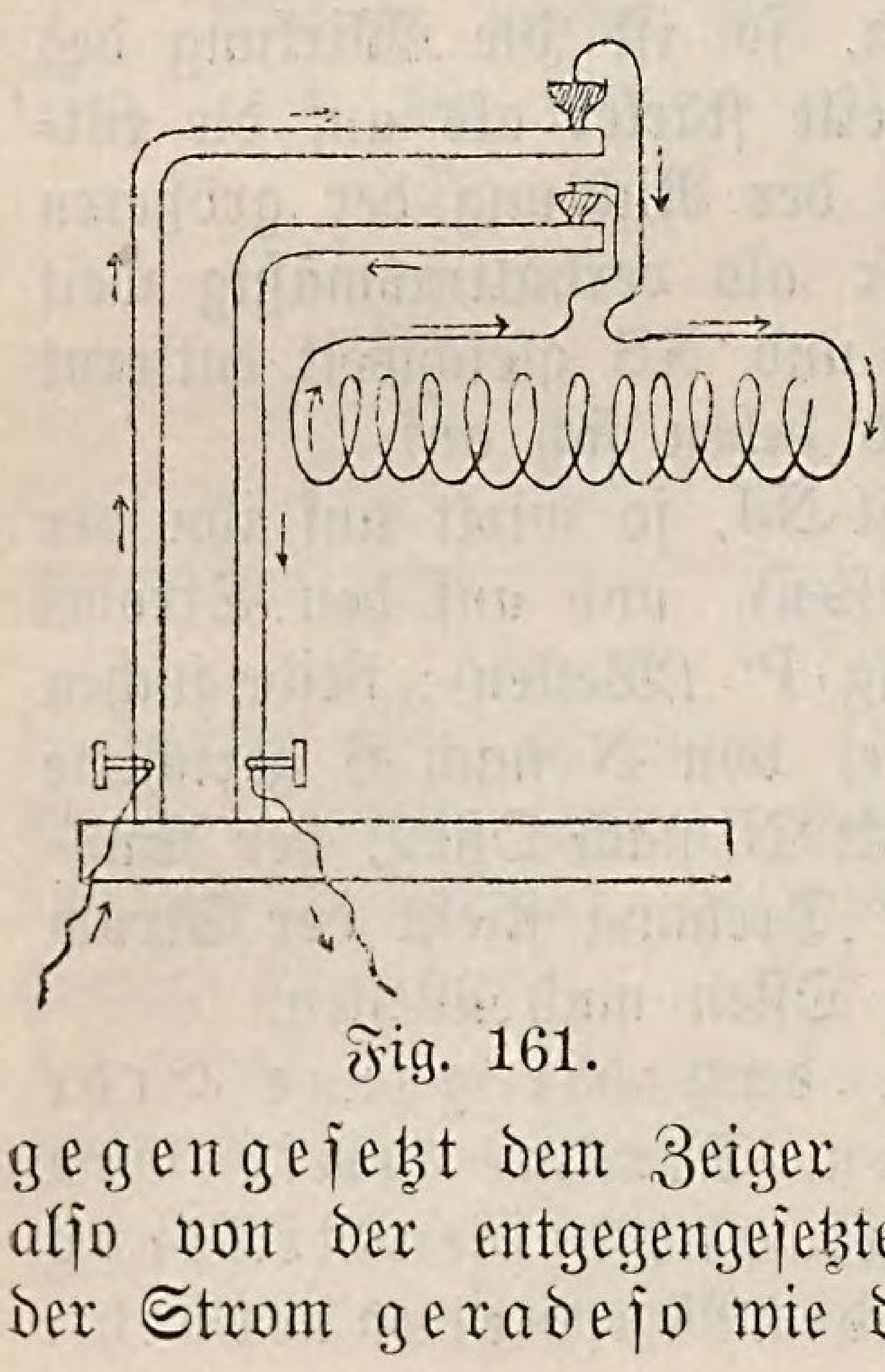
In diesem Erdstrome ist umgekehrt auch die Ursache des Erdmagnetismus zu suchen. Das heißt, die Erde hat Magnetismus wohl nicht deshalb, weil in ihr große Massen permanenter Magnete, etwa Stahlmagnete, vorhanden sind, sondern sie zeigt sich magnetisch und lenkt die Magnetnadel ab, weil sie beständig von einem elektrischen Strome umflossen wird. Steht also eine Magnetnadel nicht senkrecht zur Richtung des Erdstromes, so wird sie gedreht; auf diese Weise wirkt die Erde, also der in ihr fließende Erdstrom, wie ein großer Magnet.

Die Ursache des Erdstromes ist uns unbekannt. Er wird hervorgebracht wahrscheinlich nicht von Kräften, welche in der Erde selbst ihren Sitz haben (terrestrische oder tellurische Kräfte), sondern von Kräften, welche von außen, vom Weltraume, etwa von der Sonne her auf die Erde einwirken (kosmische Kräfte).

129. Das Solenoid.

Ein in Form eines Viereckes oder besser eines Kreises laufender Stromteil heißt ein Kreisstrom. Eine Verbindung mehrerer Kreisströme derart, daß alle ihre Mittelpunkte in einer geraden Linie, der Achse, liegen, alle ihre Ebenen auf der Achse senkrecht stehen, und alle Kreise in derselben Richtung durchlaufen werden, heißt ein Solenoid. Ein solches kann man mit großer Annäherung herstellen, wenn man einen Draht in engen Spirallinien um einen Cylinder wickelt. Versieht man die Enden dieses Solenoides mit Haken, so daß es an einem wie in Fig. 161 eingerichteten Ampère'schen Gestelle aufgehängt werden kann, so hat man ein frei bewegliches Solenoid.


Fig. 160.


Fig. 161.

Läßt man den Strom durch dasselbe laufen, so wirkt der Erdstrom auf jeden Kreisstrom desselben drehend in demselben Sinne; das Solenoid dreht sich deshalb, bis die Ströme unten von Ost nach West laufen, also die Achse die Richtung der Magnetnadel hat. Man nennt die Enden des Solenoides auch Nordpol und Südpol und findet, daß, wenn man den Nordpol von Norden betrachtet, dort der Strom läuft entgegengesetzt dem Zeiger der Uhr; betrachtet man den Südpol, also von der entgegengesetzten, südlichen Seite her, so läuft dort der Strom geradeso wie der Zeiger der Uhr. Leitet man einen

Strom in der Richtung der Achse über ein Solenoid, so dreht es sich wie eine Magnetnadel (der Nordpol weicht links aus), und man erkennt die Ursache darin, daß der Strom und die Kreisströme des Solenoides gekreuzt sind und sich parallel und gleich gerichtet zu stellen suchen. Nähert man zwei Pole zweier Solenoide einander, so findet man, daß sich gleichnamige Pole abstoßen, ungleichnamige anziehen, und erklärt sich dies aus der Wirkung paralleler Ströme.

Man findet ferner, daß die Pole eines Magnetes auf die Pole des Solenoides wie auf Magnetpole wirken. Ein magnetischer Nordpol zieht den Südpol des Solenoides an und stößt den Nordpol desselben ab. Man schließt demnach:

Ein Solenoid wirkt nach außen wie ein Magnet.

Bringt man einen Stab weiches Eisen in ein Solenoid in der Richtung der Achse, so wird das Eisen selbst magnetisch und erhält dieselben Pole, wie das Solenoid.

Dies erklärt man durch die Annahme, daß jedes Molekül Eisen beständig von einem Kreisstrom umflossen sei, daß im unmagnetischen Eisen die Achsen der Molekularkreisströme nach allen möglichen Richtungen liegen, daß sie aber durch die richtende Wirkung eines darumgelegten Solenoides parallel gerichtet werden, so daß die Molekularkreisströme sich gegenseitig verstärken; deshalb wird das Eisen magnetisch, indem es wirkt wie ein Solenoid. **Ein Magnet kann angesehen werden als ein Solenoid, dessen Kreisströme am Nordpol laufen entgegengesetzt dem Zeiger der Uhr.***)

130. Der Elektromagnet. Stärke des Elektromagnetismus.

Wenn ein Stück Eisen durch die Wirkung eines Solenoides magnetisch geworden ist, so nennt man es einen Elektromagnet.

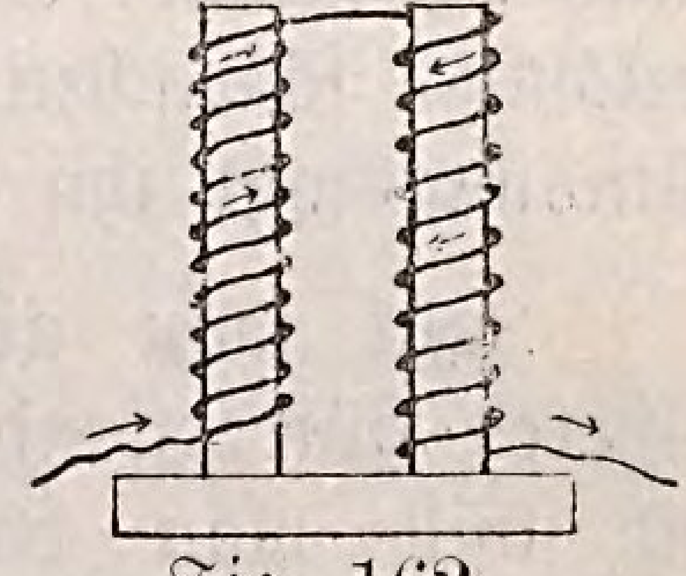


Fig. 162.

Einen Elektromagnet erhält man also, wenn man einen Strom in vielen Windungen senkrecht zur Richtung des Stabes um einen Eisenstab herumleitet; er erhält den Nordpol an dem Ende, wo der + Strom läuft entgegengesetzt dem Zeiger der Uhr; kehrt man den Strom um, so vertauschen sich auch die Pole. Gewöhnlich gibt man auch dem Elektromagnete eine Hufeisenform; er besteht dann aus zwei parallel gestellten Eisenstäben, den Eisenkernen, die unten durch ein eisernes Querstück ver-

---

*) Die Auffindung all dieser Gesetze, des Erdstroms, des Solenoids, des Elektromagnetes gelang Ampère 1800; von ihm stammt auch die Bezeichnung Solenoid (röhrenförmig).

bunden sind. Man steckt über die Kerne je eine Holzspule und umwickelt die eine mit übersponnenem Kupferdraht; ebenso umwickelt man die andere Spule mit Kupferdraht, aber in entgegengesetzter Richtung, um entgegengesetzte Pole zu erhalten, und führt die Enden zu zwei Klemmschrauben, mittels deren man den Strom einleitet. Bei Stromschluß werden die Eisenkerne magnetisch, beim Öffnen werden sie wieder unmagnetisch.

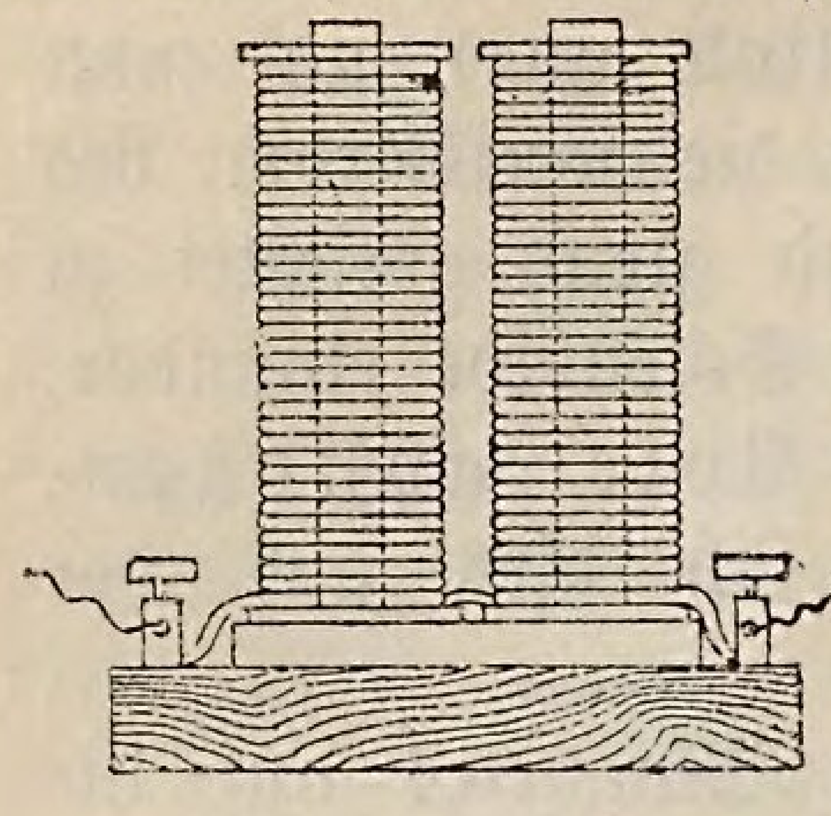


Fig. 163.

Elektromagnete werden verhältnismäßig stärker magnetisch als Stahlmagnete. Es kommt dies wohl daher, daß beim weichen Eisen sich die Moleküle leichter und vollständiger drehen, polarisieren lassen als beim Stahle. Die Stärke des Magnetismus hängt ab von der Masse der Eisenkerne; je größer deren Masse, desto mehr Moleküle können polarisiert werden, desto stärker ist der Magnetismus; ferner von der polarisierenden Kraft, also von der Stärke des Stromes und der Anzahl der Windungen; jedoch kann ein Stück Eisen nicht beliebig stark magnetisiert werden; sind nämlich durch einen starken Strom alle Moleküle vollständig oder nahezu vollständig polarisiert, so ist der Magnet gesättigt, seine Kraft wird nicht oder nur sehr wenig verstärkt, wenn man einen stärkeren Strom oder noch mehr Windungen nimmt.

Sehr mächtige Elektromagnete bestehen aus sehr dicken Eisenkernen, welche mit verhältnismäßig wenig Windungen (oft bloß einer Lage) dicken Kupferdrahtes umwickelt sind, so daß der Widerstand desselben sehr gering ist; man benützt den Strom eines Elementes von sehr geringem inneren Widerstande oder einer auf Quantität verbundenen Batterie, die dann einen sehr starken Strom liefert. Vergrößerung der Windungszahl würde den äußeren Widerstand verstärken, also den Strom schwächen und dadurch den Magnetismus schwächen fast um ebensoviel, als die Vergrößerung der Windungszahl ihn verstärkt.

Hat man aber Ströme, welche, da sie schon einen großen äußeren Widerstand überwinden mußten, an sich schon schwach sind, und will man damit gleichwohl ziemlich starke Elektromagnete herstellen, so nimmt man dünnen Draht und macht sehr viele Windungen; die dadurch erfolgte Vergrößerung des äußeren Widerstandes schadet der Stromstärke nicht mehr viel, während die Vergrößerung der Windungszahl den Magnetismus verstärkt. Größe der Eisenkerne, Anzahl und Art der Windungen müssen demnach stets der Natur des zur Verwendung kommenden Stromes angepaßt werden, um einen Elektromagnet von gewünschter Stärke zu erlangen.

Die Eisenkerne müssen aus möglichst weichem Eisen bestehen, damit sie den Magnetismus leicht annehmen und beim Öffnen des Stromes möglichst vollständig wieder verlieren.

Wird der Strom um Stahl geleitet, so wird der Stahl auch magnetisch, wenn auch nicht so gut als weiches Eisen; beim Herausziehen behält der Stahl aber seinen Magnetismus fast vollständig. Man kann so sehr kräftige permanente Stahlmagnete machen, leichter und stärker, als man sie durch Bestreichen mit einem Stahlmagnete erhält; man wendet aber auch hiebei meist die Streichmethode an, indem man den zu magnetisierenden Stahl an den Polen eines kräftigen Elektromagnetes streicht.

131. Die elektrische Klingel und ihre Anwendung.

Die elektrische Klingel hat folgende Einrichtung: vor den Polen eines Elektromagnetes befindet sich ein Stück weiches Eisen, der Anker; er ist befestigt an einem federnden Stahlblech, welches ihn etwas von den Polen wegzieht. Der Anker trägt an einem Fortsatz einen Klöppel, der an eine Glocke schlägt, wenn der Anker zu den Polen hinbewegt wird. Das am Anker befestigte Stahlblech hat auch einen Fortsatz, welcher eine Stellschraube berührt, wenn der Anker von den Polen entfernt wird, dagegen die Stellschraube nicht mehr berührt, wenn der Anker den Polen genähert wird.

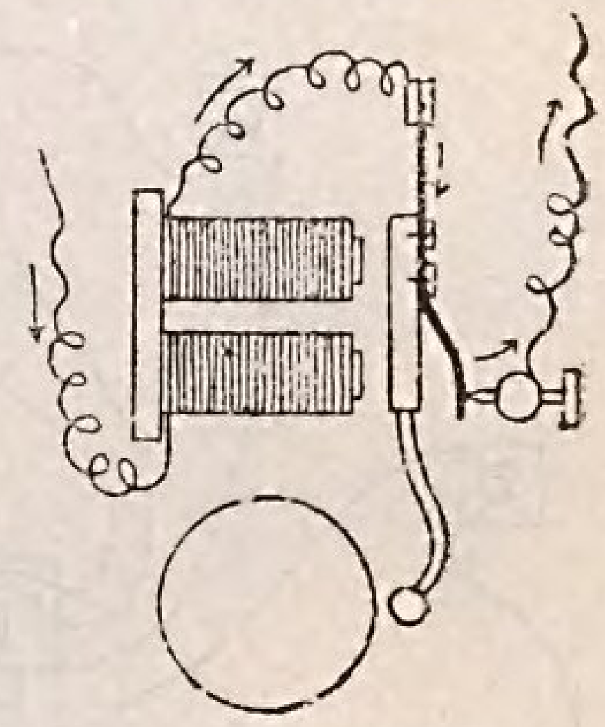


Fig. 164.

Der Strom durchläuft die Windungen des Elektromagnetes, geht dann in das federnde Stahlblech und durch die berührende Stellschraube zur Batterie zurück. Hält man den Strom geschlossen, so werden die Magnete erregt, ziehen den Anker an und bewirken so einen Glockenschlag. Durch die Bewegung des Ankers hat sich aber die Stahlfeder auch von der Stellschraube entfernt und hat den Strom dadurch unterbrochen (Selbstunterbrechung); die Magnete verlieren dadurch ihre Kraft und lassen den Anker los, der durch die Federkraft sich wieder von den Polen entfernt. Dadurch kommt aber die Stahlfeder wieder in Berührung mit der Stellschraube, stellt also den Strom wieder her und es beginnt derselbe Vorgang und wiederholt sich, so lange man den Strom geschlossen hält; es entstehen also infolge der Selbstunterbrechung in rascher Aufeinanderfolge Schläge an die Glocke, also ein Klingeln, dessen Tempo durch die Stellung der Stellschraube etwas reguliert werden kann.

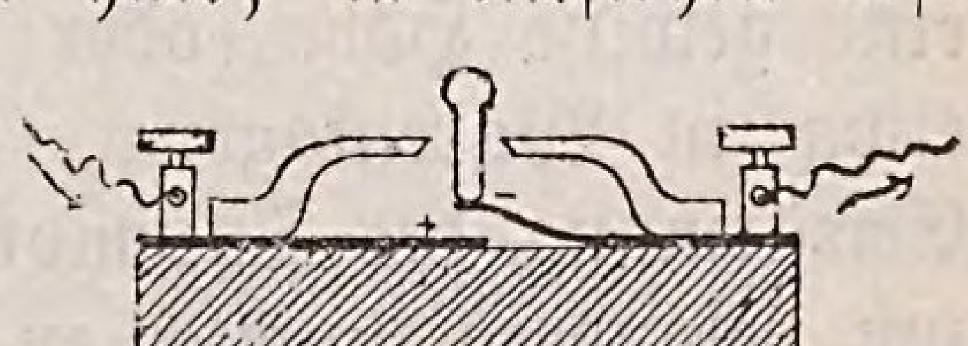
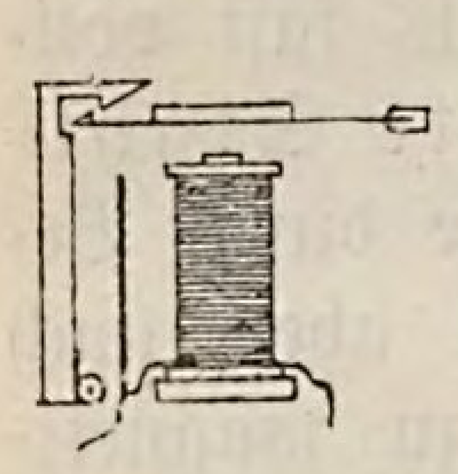


Fig. 165.

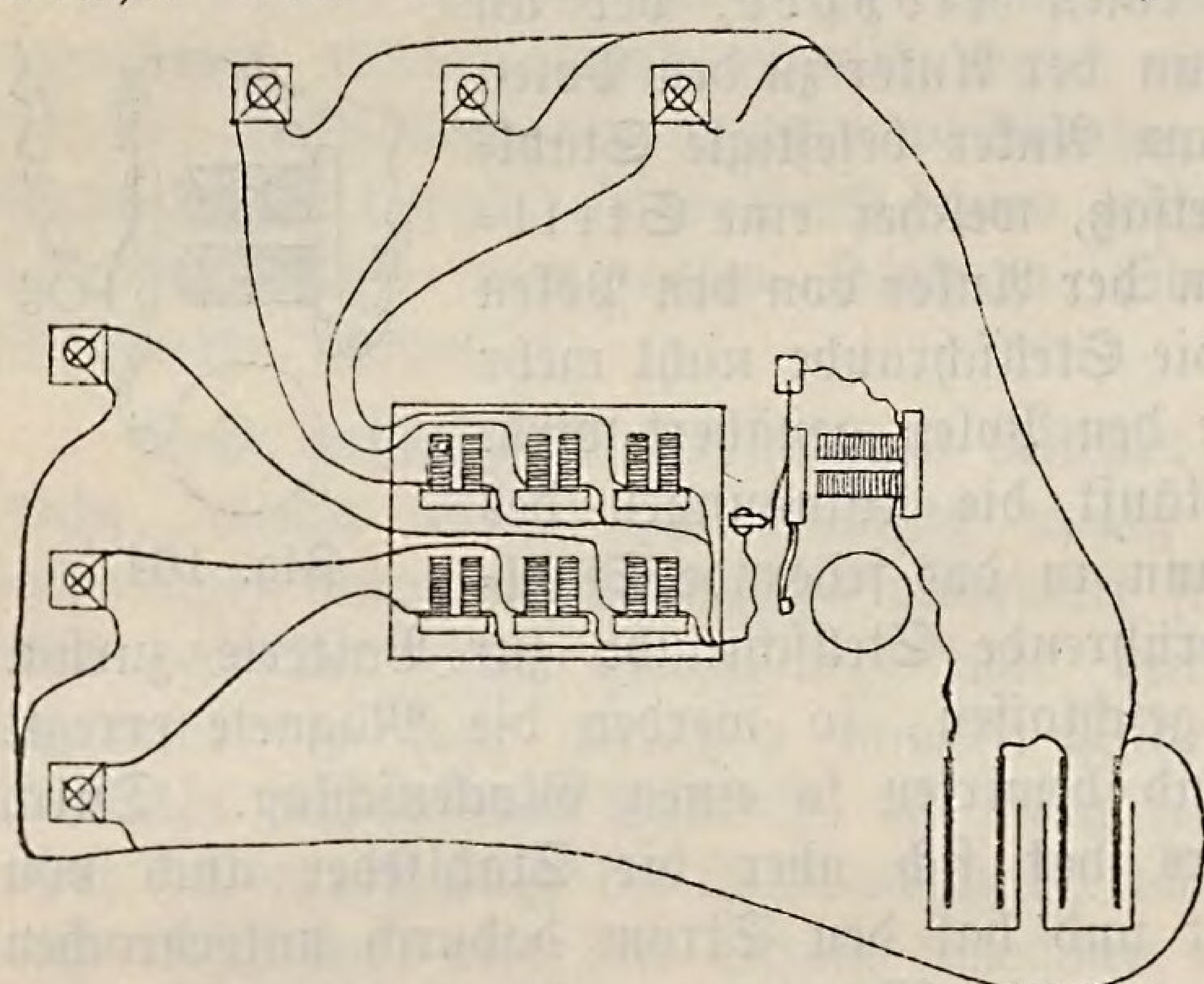
Um den Strom bequem schließen zu können, bedient man sich eines Drückers, bei dem man mittels

eines Porzellan- (Bein-)Knopfes ein etwas in die Höhe gebogenes, elastisches Blechstück auf ein festes Blechstück niederdrückt.

Beim Haustelegraphen, wie er besonders in Gasthäusern vielfach verwendet wird, kann man durch den im Zimmer befindlichen Drücker den Strom schließen und so durch Klingeln ein Zeichen geben. Um aber zu erfahren, in welchem Zimmer gerufen wird, werden die Drähte von den Drückern durch einen Nummernkasten geleitet, in welchem für jedes Zimmer ein Nummernapparat Fig. 166 sich befindet. Dieser besteht im wesentlichen aus einem kleinen Elektromagnet, der einen Anker anzieht; dieser läßt dabei eine kleine Fallthüre los, welche herunterklappt und dadurch die betreffende Zimmernummer sichtbar macht. Die Art der Drahtführung ist aus Fig. 167 leicht ersichtlich, aus der man auch erkennt, daß man für alle Zimmer mit nur einer Batterie von einigen Meidingerelementen ausreicht.


Fig. 166.

Das folgende Schema Fig. 168 zeigt eine Einrichtung, bei welcher man von einem Orte aus nach verschiedenen Richtungen hin Klingelsignale geben kann; sie wird in Fabriken, größeren Geschäften 2c. benützt.


Fig. 167.

Der elektrische Feuermelder. Er besteht aus einem Thermostreifen (Streifen aus Zink und Eisen), der am einen Ende festgeklemmt ist und bei Temperaturänderungen mit dem anderen Ende kleine Bewegungen macht. Er berührt dann eine Stellschraube und schließt dadurch den Strom, der von der Batterie in den Thermostreifen geleitet und dann von der Stellschraube zur Klingel geführt wird. Durch Drehen der Stellschraube kann bewirkt werden, daß der Strom stets dann geschlossen wird, wenn die Temperatur eine gewisse Höhe (oder Tiefe) erreicht hat. Man verwendet sie so etwa in Warenlagern, damit ein ausbrechender Brand sich durch Erwärmung des Thermostreifens signalisiert, und in Gewächshäusern, um besonders nachts zu hohe und zu niedrige Temperaturen desselben signalisieren zu lassen. Fig. 169.

Der Einbruchsmelder, elektrische Sicherung gegen Einbruch. Man bringt an der Thüre des Kassaschrankes oder des

Zimmers oder Ladens ꝛc. einen Kontakt an, der sich von selbst schließt, sobald die Thüre nur ein wenig geöffnet wird. Die ge-

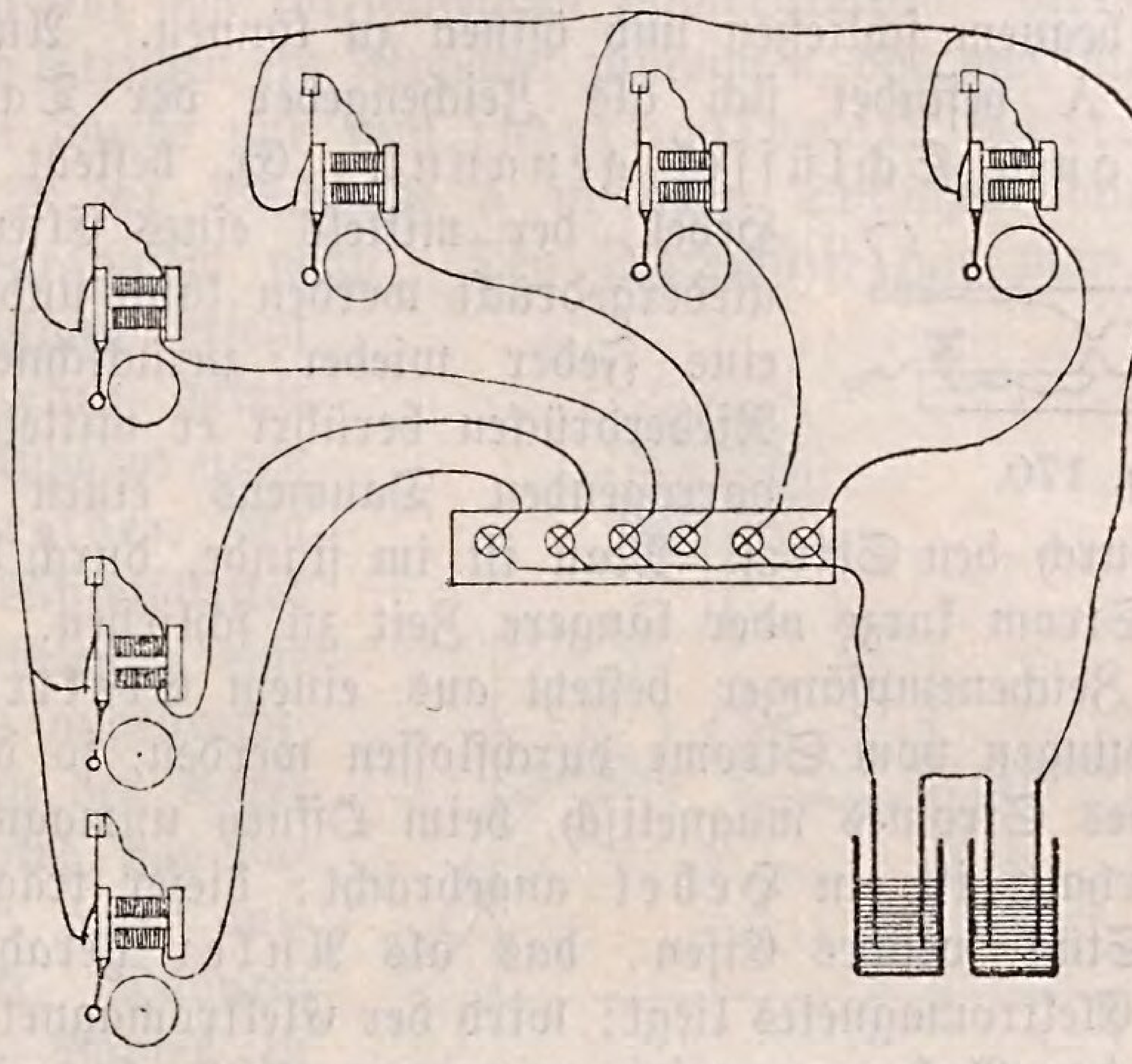


Fig. 168.

schlossene Thüre drückt auf einen Hebel, beim Öffnen schnappt derselbe durch eine Feder zurück, berührt mit seinem andern Ende ein Platinplättchen und schließt dadurch den Strom, der zu einer elektrischen Klingel führt und so das Öffnen der Thüre signalisiert. Um untertags unnötigen Lärm zu verhindern, kann man etwa durch Ausziehen eines Stöpsels zwischen zwei Backen den Strom unterbrechen.

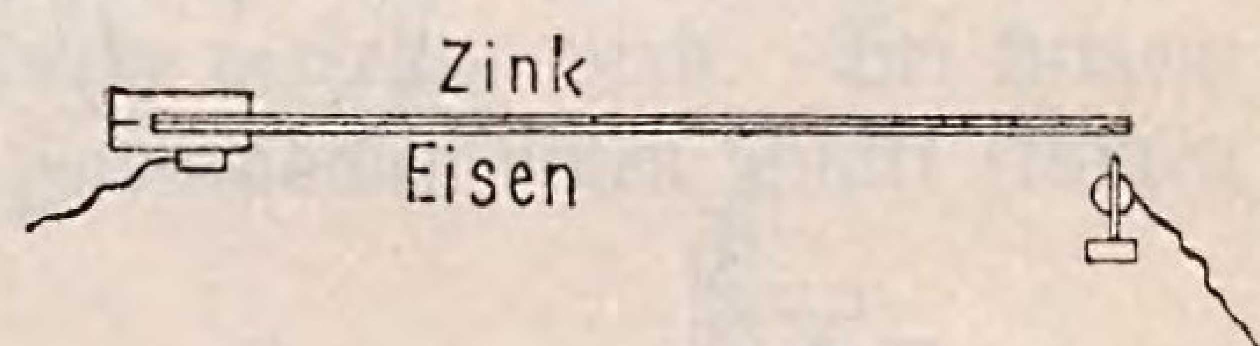


Fig. 169.

Die elektrischen Telegraphen.

132. Der Morsesche Schreibtelegraph.

Der Telegraph (Fernschreiber) ermöglicht, Zeichen, welche die Bedeutung von Buchstaben haben, in sehr kurzer Zeit an einen weit entfernten Ort zu signalisieren.

Schon im Jahre 1809, kurz nachdem Volta seine Säule gebaut hatte, schlug Sömmering vor, mittels Wasserzersetzung zu telegraphieren; doch hat diese Einrichtung niemals praktische Verwendung gefunden. Schilling konstruierte 1832 das Modell eines Telegraphen und Gauß und Weber stellten 1833 die erste größere Telegraphenleitung in Göttingen her. Doch kann deren Einrichtung auch erst später erklärt werden. Steinheil in München verbesserte den Apparat (1838), so daß schon geschriebene Zeichen übermittelt wurden. Morse, ein Amerikaner, konstruierte 1837 ein Modell und etwas später den Schreibtelegraphen, welcher noch gegenwärtig in Verwendung steht.

Der Morsesche Schreibtelegraph.

Der Zeichengeber hat den Zweck, den Strom nach Belieben und bequem schließen und öffnen zu können. Auf der Aufgabestation A befindet sich als Zeichengeber der Taster oder Drücker, auch Schlüssel genannt. Er besteht aus einem Hebel, der mittels eines Elfenbeinknopfes niedergedrückt werden kann und dann durch eine Feder wieder zurückschnellt. Beim Niederdrücken berührt er mittels eines hervorragenden Daumens einen Stift und schließt dadurch den Strom. Man ist im stande, durch den Zeichengeber den Strom kurze oder längere Zeit zu schließen.

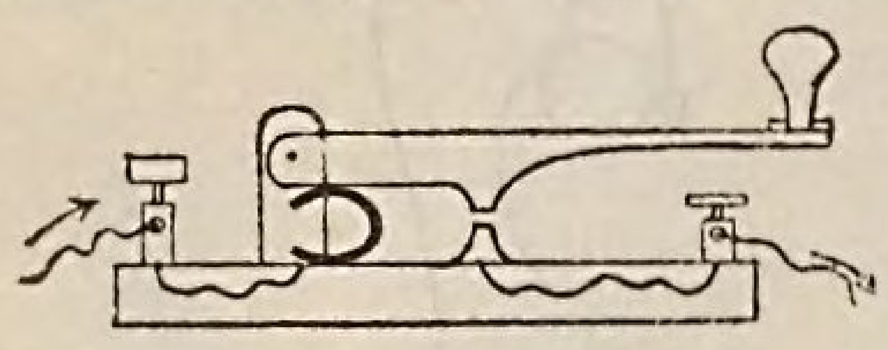


Fig. 170.

Der Zeichenempfänger besteht aus einem Elektromagnet, dessen Windungen vom Strome durchflossen werden, so daß er beim Schließen des Stromes magnetisch, beim Öffnen unmagnetisch wird. Etwas oberhalb ist ein Hebel angebracht; dieser trägt am einen Ende ein Stück weiches Eisen, das als Anker gerade über den Polen des Elektromagnetes liegt; wird der Elektromagnet magnetisch, so zieht er den Anker an, wird er unmagnetisch, so reißt eine am Hebel angebrachte Feder (Abreißfeder) den Anker wieder von

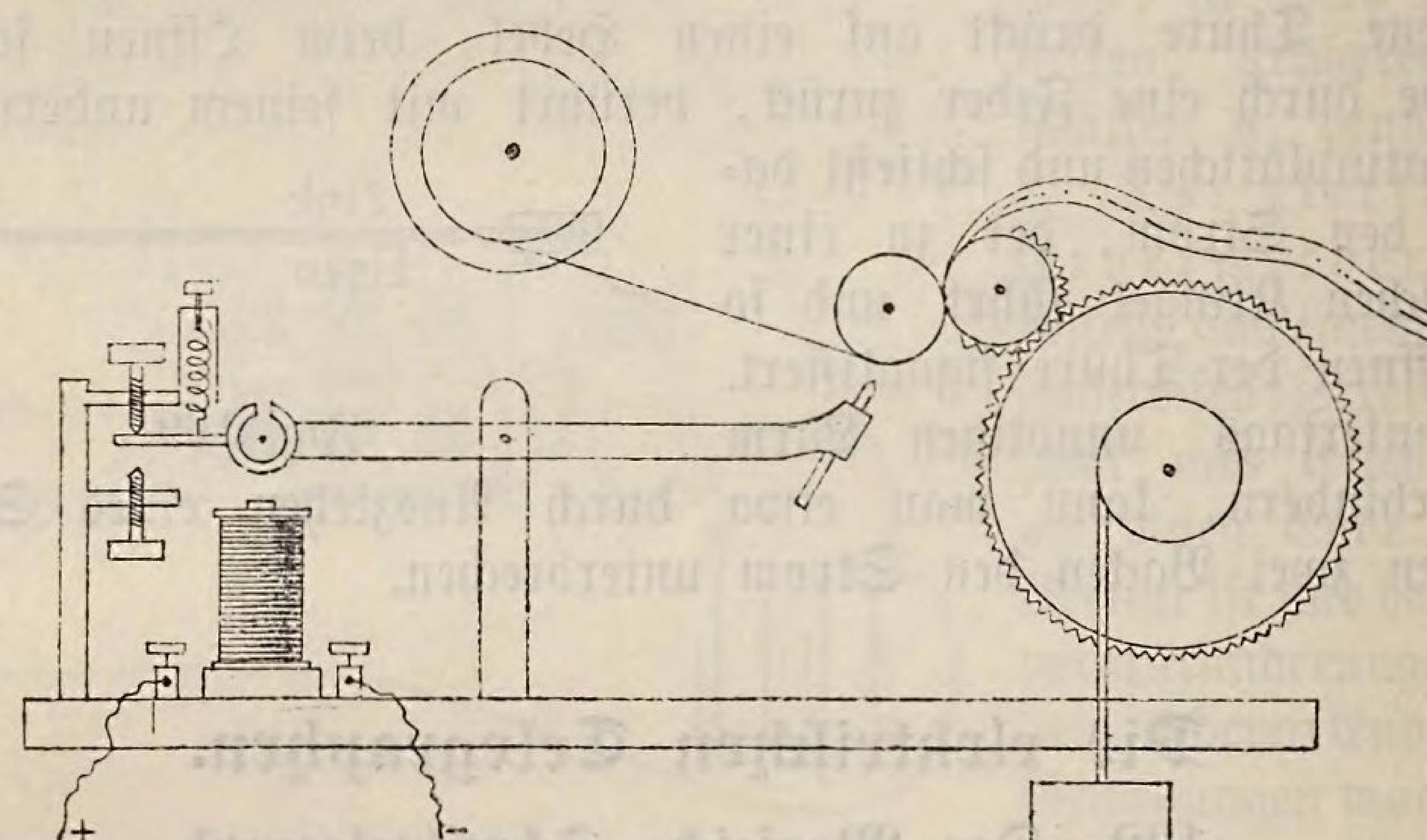


Fig. 171.

den Polen weg. Stellschrauben, welche ober- und unterhalb des Hebels angebracht sind, verhindern, daß er zuweit nach aufwärts oder abwärts geht. Dadurch bewegt sich auch das andere Hebelende, welches einen Schreibstift (Bleistift oder Stahlstift) trägt. So oft und so lang nun der Anker angezogen ist, drückt der Schreibstift auf einen Papierstreifen und macht auf ihm Zeichen. Der Papierstreifen kommt von einer Papierrolle und läuft zwischen zwei rauhen Walzen durch; die Walzen werden durch ein Triebwerk (Uhrwerk, das von Zeit zu Zeit aufgezogen wird) in mäßige Drehung versetzt, ziehen dabei den Papierstreifen heraus und führen

ihn in der Nähe des Schreibstiftes vorbei. Bei kurzem Stromschlusse macht der Schreibstift deshalb nur einen Punkt, bei längerem einen Strich auf den fortlaufenden Papierstreifen. Morse setzte aus Punkten und Strichen ein Alphabet zusammen, das von allen Nationen angenommen wurde und nun internationale Gültigkeit hat, so daß z. B der Buchstabe a in allen Sprachen durch dasselbe Zeichen telegraphiert wird. Den Schreibstift hat man durch eine Färbevorrichtung ersetzt und nennt einen damit versehenen Apparat einen Farbenschreiber. An Stelle des Schreibstiftes ist am Hebelende eine kleine Platte angebracht, welche, wenn der Anker angezogen wird, das Papier etwas nach aufwärts drückt. Dadurch kommt das Papier in Berührung mit dem Schreibrädchen; das ist eine Scheibe, die am Rande eine stumpfe Schneide besitzt, durch das Uhrwerk beständig gedreht wird, dabei eine Farbwalze berührt und von derselben mit zähflüssiger Farbe versehen wird. Bei kurzem Stromschlusse erhält das Papier vom Farbrädchen einen Punkt (kurzen Strich), bei langem einen Strich.

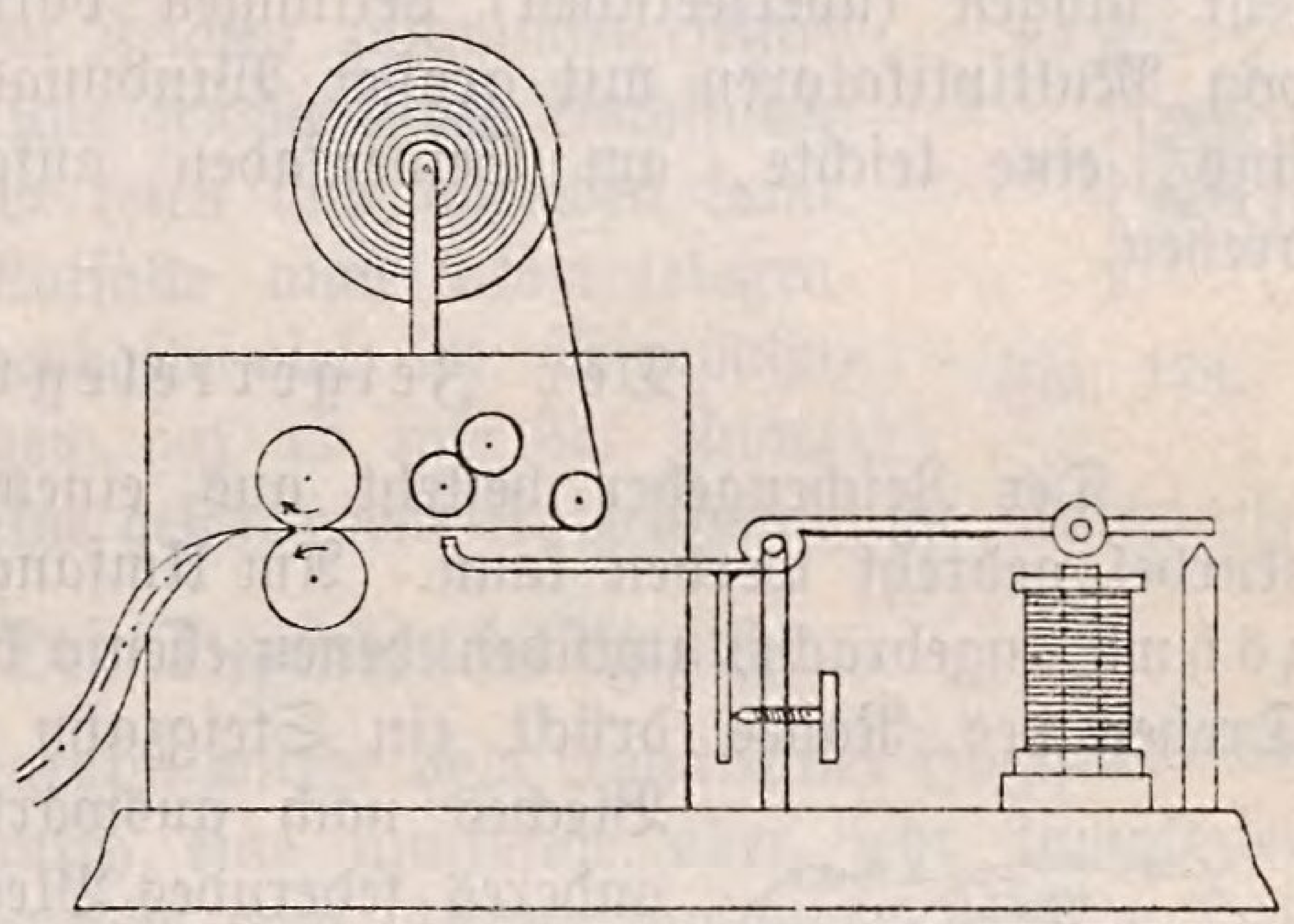


Fig. 172.

133. Der Nadel- und der Zeiger-Telegraph.

Der Nadeltelegraph, besonders von Wheatstone in England eingeführt, ist dort noch heute vielfach in Benützung. Der Zeichengeber besteht aus einem Drücker, ähnlich dem Morseschen, durch den man im stande ist, nach Belieben den positiven oder den negativen Strom in die Telegraphenleitung zu schicken (Kommutator, Stromwender). Der Zeichenempfänger besteht aus einer Magnetnadel, die mit Multiplikatorwindungen umgeben ist. Da nun je nach der Richtung des Stromes die Nadel nach der einen oder anderen Seite abgelenkt wird, so kann man nach Belieben Ausschläge nach rechts oder links hervorbringen, und damit ein Alphabet zusammensetzen wie mit Punkten und Strichen.

Der Nadeltelegraph hat den großen Nachteil, daß er keine schriftlichen Aufzeichnungen hinterläßt, daß stets zwei Beamte zugleich beschäftigt sein müssen, und daß sich beim Ablesen der Nadelausschläge leicht Fehler einschleichen können. Man hat auch Nadeltelegraphen eingerichtet mit zwei neben einander stehenden Apparaten, also zwei Tastern, zwei Leitungen, zwei Galvanometernadeln. Da

beide Apparate zugleich zur Bildung der Zeichen benützt werden, so sind die Zeichen viel einfacher, da man 4 verschiedene Zeichen (1 r, 1 l, 2 r, 2 l), benützen kann; es können demnach 4 Buchstaben durch je 1 Zeichen, und noch 16 durch bloß je 2 Zeichen ausgedrückt werden; dadurch wird viel Zeit erspart.

Ein großer Vorteil des Nadeltelegraphen ist seine fast unbegrenzte Empfindlichkeit, da auch sehr schwache Ströme, wie sie bei sehr langen (überseeischen) Leitungen vorkommen, durch Benützung von Multiplikatoren mit großer Windungszahl doch noch im stande sind, eine leichte, am Seidenfaden aufgehängte Magnetnadel zu drehen.

Der Zeigertelegraph.

Der Zeichengeber besteht aus einem Rade, das durch eine Kurbel gedreht werden kann. Am Umfange des Rades sind Steigzähne angebracht, zwischen denen ebenso breite Lücken sind. Beim Drehen des Rades drückt ein Steigzahn das Ende eines federnden Bleches nach auswärts, so daß es gegen ein anderes federndes Blech drückt und dadurch den Strom schließt. Ist der Zahn vorübergegangen, so springt die Feder in die nächste Lücke und der Strom ist offen, bis der nächste Zahn die Feder wieder nach außen drückt, und den Strom wieder schließt u. s. w., durch Umdrehen des Rades wird also in regelmäßiger Folge der Strom geschlossen und wieder geöffnet. Neben den Zähnen und Lücken sind die aufeinanderfolgenden Buchstaben des Alphabetes angeschrieben.

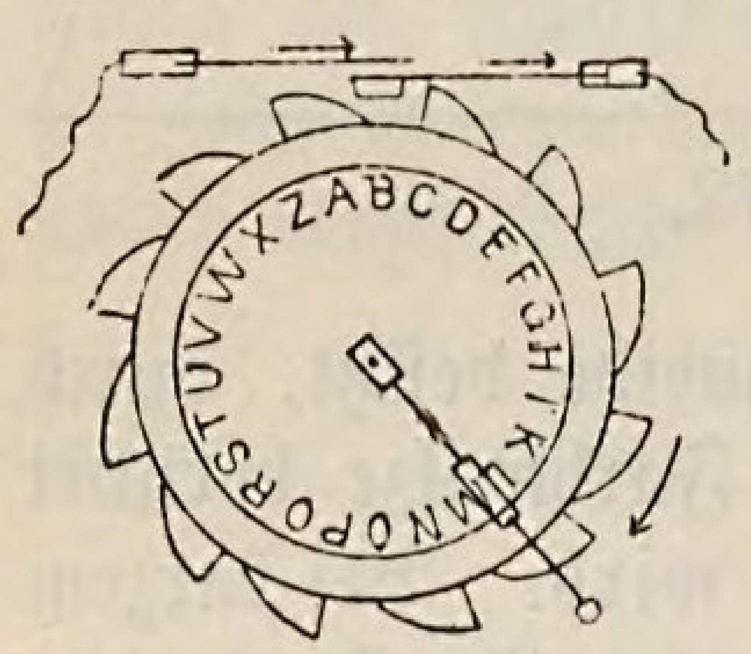
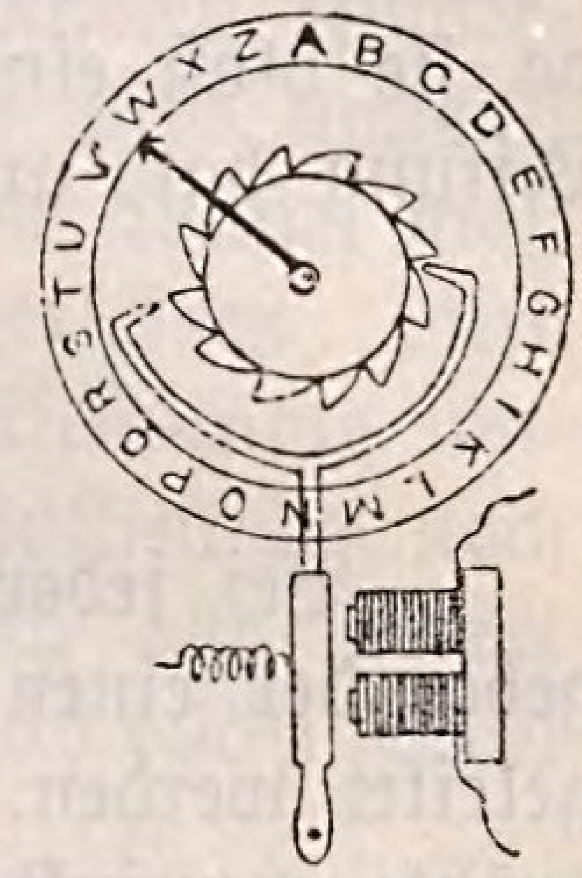


Fig. 173.

Der Zeichenempfänger besteht aus einem Elektromagnete; vor seinen Polen ist ein Anker an einer Achse drehbar; der Anker hat nach der anderen Seite einen Fortsatz, der sich gabelt und an den beiden Enden zwei Stifte trägt. Wird der Elektromagnet magnetisch, so zieht er den Anker an, die Gabel geht nach rechts; wird er unmagnetisch, so wird der Anker durch eine Abreißfeder wieder von den Polen weggezogen und die Gabel geht nach links. Dabei drücken von den Stiften der Gabel bald der eine, bald der andere gegen die Zähne eines Steigrades (Rad mit schrägen Zähnen) und drücken es immer um einen Zahn weiter. Mit dem Steigrad ist ein Zeiger verbunden, der vor einem Kreise sich bewegt, auf welchem die Buchstaben des Alphabetes angeschrieben sind.

Wird nun durch den Zeichengeber der Strom abwechselnd geschlossen und geöffnet, so rückt auch der Zeiger des Zeichenempfängers gleichmäßig um je einen Buchstaben des Alphabetes weiter. Bei Beginn des Telegraphierens stellt man den eben berührenden Zahn des Zeichengebers und den Zeiger des Zeichenempfängers auf den-

selben Buchstaben, so rücken auch beim Drehen beide gleich rasch weiter. Man dreht das Rad des Zeichengebers ziemlich rasch bis zum ersten gewünschten Buchstaben, hält einen Moment inne, dreht das Rad bis zum 2. gewünschten Buchstaben, hält inne, u. s. f.; so sieht der Beamte am Zeichenempfänger, bei welchen Buchstaben der Zeiger stehen bleibt, und kann daraus das Telegramm wieder zusammensetzen. Ein großer Vorteil des Zeigertelegraphen besteht darin, daß man kein aus eigenen Zeichen zusammengesetztes Alphabet braucht, sondern die gewöhnlichen Buchstaben benützt, so daß jeder, der lesen und schreiben kann, nach kurzer Übung, im Notfalle auch sofort telegraphieren kann; er wird deshalb viel im Eisenbahndienst gebraucht. Dagegen hat er wie der Nadeltelegraph den Nachteil, keine geschriebene Aufzeichnung zu hinterlassen.


Fig. 174.

134. Der Typendrucktelegraph.

Der Typendrucktelegraph wurde vom Amerikaner Hughes (1859) erfunden und bewirkt durch eine sinnreiche aber sehr komplizierte Einrichtung, daß die Depesche vom Zeichenempfänger selbst auf den Papierstreifen in gewöhnlicher Schrift gedruckt wird.

Die Typendrucktelegraphen wirken vollkommen sicher, arbeiten etwa 3 mal schneller als die Morse'schen Schreibtelegraphen und ersparen in der Empfangstation die Mühe des Abschreibens der Depesche, da dem Adressaten die bedruckten Papierstreifen unmittelbar übergeben werden können. Auf allen bedeutenderen Stationen sind schon solche Typendrucktelegraphen in Gebrauch.

135. Das Relais.

Wenn man von einer Hauptstation mit mehreren, hinter einander liegenden Nebenstationen in Verbindung treten will, so müßte der Strom so stark sein, daß er in sämtlichen Stationen zugleich die Anziehung der Anker bewirkt. Hiezu müßte der Strom eine beträchtliche Stärke haben. Man erzielt eine Ersparnis durch Einrichtung des Relais.

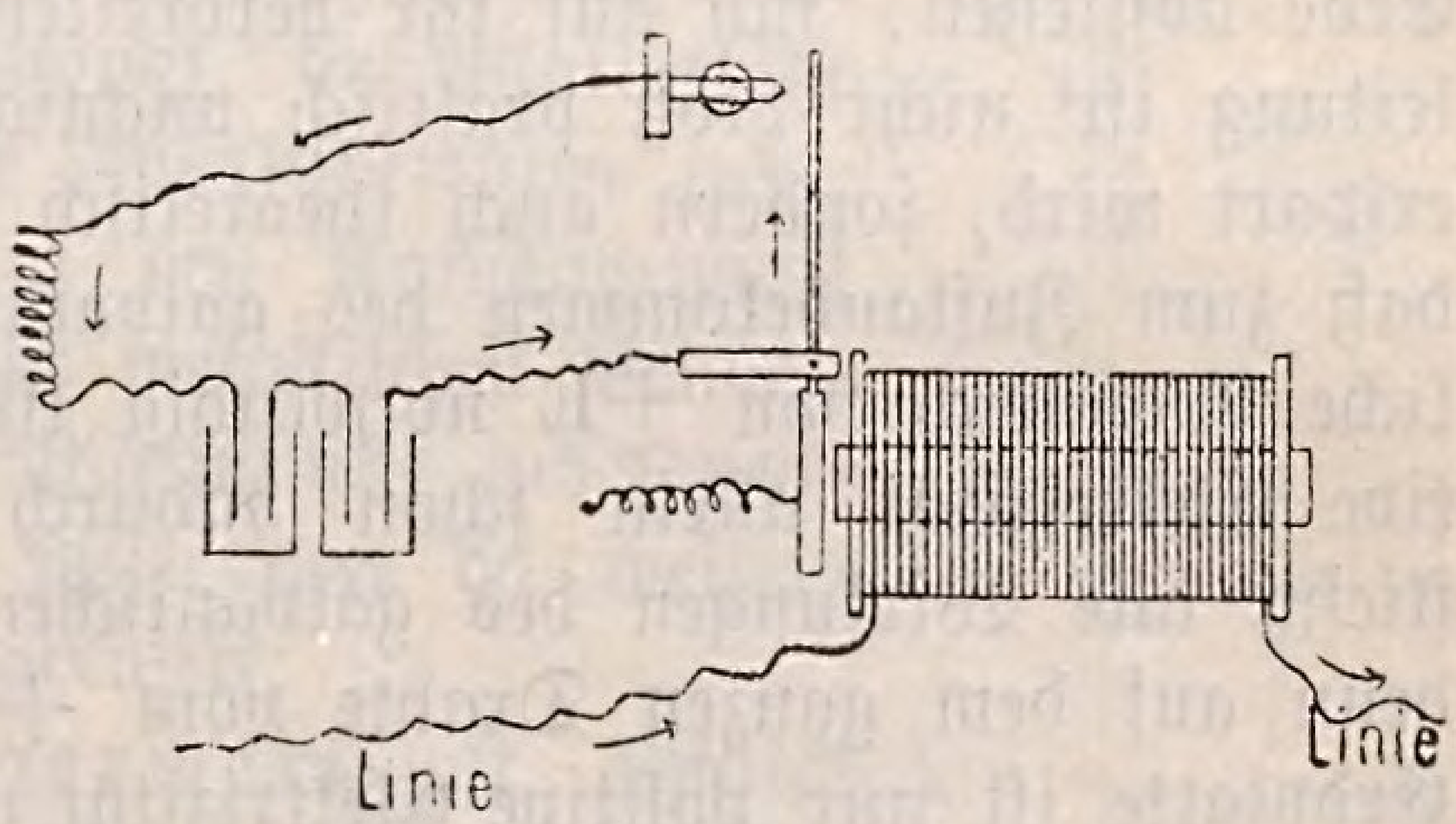


Fig. 175.

Ein Relais besteht aus einem Elektromagnet, vor dessen Polen ein leicht beweglicher Anker angebracht ist. Wird derselbe angezogen, so schließt er dadurch, daß er eine Stellschraube berührt, den Strom einer Lokalbatterie, die den Elektromagnet des Zeichenempfängers versieht. Da der Elektromagnet des

Relais keine Arbeit zu leisten hat, so kann er sehr leicht beweglich gemacht werden, so daß eine Linienbatterie von mäßiger Elementenzahl hinreicht, alle Relais zu bedienen, die auf den Nebenstationen vorhanden sind. Die Lokalbatterie jeder Station braucht, da sie bloß einen Elektromagneten zu versehen hat und keine lange Leitung hat, auch nur aus 2 oder 3 Elementen zu bestehen.

136. Telegraphenleitung.

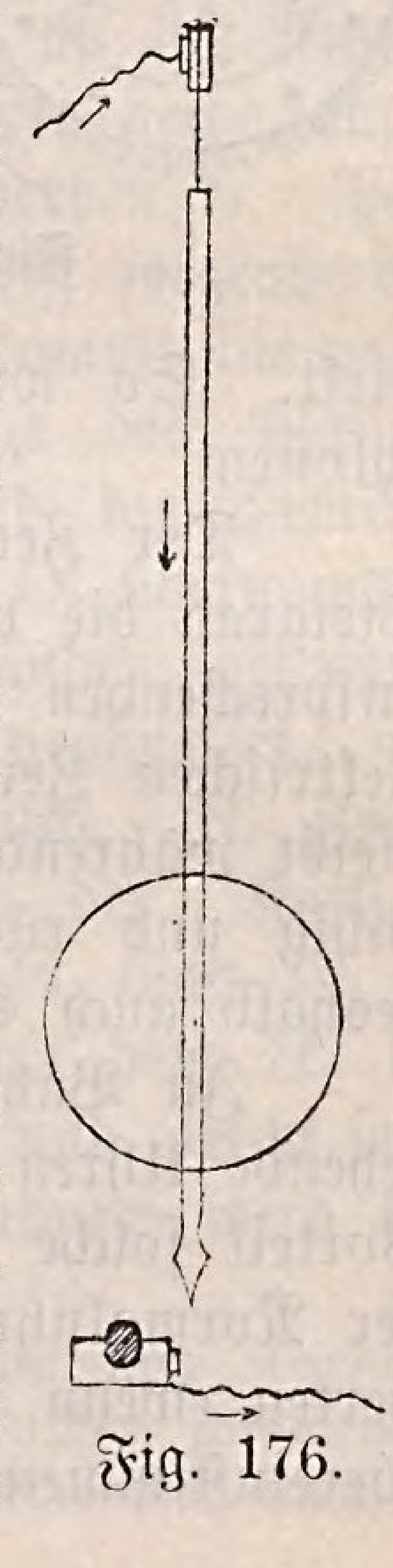
Bei jeder Telegrapheneinrichtung muß der Strom vom Zeichengeber der einen Station zum Zeichenempfänger der andern Station geleitet werden. Es geschieht dies durch die bekannten Telegraphendrähte, verzinkte Eisendrähte. Sie werden von hohen Stangen getragen und, damit sie von der Erde isoliert sind, auf Glas- oder Porzellanglocken befestigt. Es sollte eine ebensolche Leitung vom Zeichenempfänger zum andern Pole der Batterie zurückführen. Aber bald nach Erfindung der Telegraphen fand Steinheil (1837), daß man diese Rückleitung ersparen und an ihrer Stelle überdies noch mit erheblichen Vorteilen die Erde benützen könne (Erdleitung). Man führt nämlich von dem einen, etwa dem —Pole der Batterie einen Draht in die feuchte Erde und läßt ihn dort in eine Platte (Bodenplatte) endigen. Dadurch ist dieser Pol abgeleitet. Man führt nun vom andern, dem +Pole der Batterie, den Draht zum Drücker, dann zur Telegraphenleitung (Linie), zum Elektromagnet des Zeichenempfängers und dann auch sofort zur Erde in eine Bodenplatte; dadurch ist auch der positive Pol abgeleitet. Wenn also durch den Drücker der Strom geschlossen wird, so läuft einerseits die —E direkt zur Erde, andrerseits läuft die +E durch Leitung und Empfänger zur Erde. Man hat sich nicht etwa vorzustellen, daß die +E von der einen Bodenplatte durch die Erde wieder auf kurzem oder kürzestem Wege zurücklaufe zur andern —Bodenplatte, sondern daß von beiden Bodenplatten aus beide Elektrizitäten zur Erde abfließen, sich auf ihr verbreiten und ausgleichen. Die Erdleitung ist nicht bloß praktisch wichtig, weil durch sie ein Draht erspart wird, sondern auch theoretisch interessant, weil man erkennt, daß zum Zustandekommen des galvanischen Stromes nicht der wirkliche Ausgleich von $\pm$E notwendig ist, sondern daß etwa die positive Elektrizität allein schon dadurch, daß sie durch den Draht fließt, alle Wirkungen des galvanischen Stromes hervorbringen kann, denn auf dem ganzen Drahte vom +Pole bis zur weit entfernten Erdplatte ist nur positive Elektrizität vorhanden, am Pole von hoher Spannung, an der Erdplatte von sehr geringer Spannung (= 0). Diese ungleiche Verteilung der Elektrizität bringt den Strom hervor, wenn durch Ableitung des —Poles dafür gesorgt ist, daß auch der —Pol keine hohe Spannung bekommen kann.

Soll eine Telegraphenleitung durch das Meer gelegt werden (submarine Leitung), so muß der Leitungsdraht von der Berührung mit dem Wasser durch einen isolierenden Stoff geschützt werden. Der Leitungsdraht besteht dann gewöhnlich aus 7 dünnen Kupferdrähten, die zu einer Litze zusammengedreht sind; sie wird umhüllt mit Kautschuk, der die Elektrizität nicht leitet und vom Wasser nicht angegriffen wird. Um dieser Leitung Festigkeit zu verleihen, wird sie mit Hanf und dann mit einem Kranze dicker Eisendrähte umgeben, nochmal mit Hanf umsponnen (worauf beim Küstenkabel noch ein Kranz von Eisenstäben folgt) und geteert. Durch alle Meere sind schon solche submarine Kabel gelegt, das erste 1866 (950 Kabel mit zus. 112 Millionen Seemeilen Länge 1881).

In Deutschland ist auch schon eine große Länge unterirdischer Kabel gelegt. Sie enthalten meist mehrere Kupferdrahtleitungen, deren jede durch Kautschuk isoliert ist, so daß jede für sich zum Telegraphieren benützt werden kann. Sie sind dann zu einem Seile zusammengewickelt, mit Hanf umsponnen und mit verzinktem Eisendrahte umgeben. So werden sie metertief in die Erde gelegt. Die wichtigsten Städte sind durch solche unterirdische Telegraphen, die nicht den Beschädigungen durch Stürme, Nebel oder Rauhfrost ausgesetzt sind, verbunden.

137. Die elektrischen Uhren.

Der galvanische Strom wird auch dazu benützt, den Gang einer Uhr auf ein weit entferntes Zeigerwerk zu übertragen, so daß beide stets dieselbe Zeit angeben. Eine solche Einrichtung nennt man eine elektrische Uhr. Hat man eine Uhr mit einem Sekundenpendel und und will dessen Schwingungen übertragen, so versieht man das untere Ende des Pendels mit einer Platinspitze, und bringt unterhalb derselben ein Eisenklötzchen isoliert an, das eine Vertiefung hat. In diese Vertiefung bringt man Quecksilber und zwar so viel, daß es noch über die Vertiefung herausschaut und daß, wenn das Pendel schwingt, die Platinspitze bei jeder Schwingung durch die Quecksilberkuppe geht. Leitet man nun den Strom in den Aufhängepunkt des Pendels, so läuft er in der metallischen Pendelstange herunter, tritt durch die Platinspitze ins Quecksilber und den Eisenklotz und wird von da weitergeführt zu dem elektrischen Zeigerwerk.


Fig. 176.

Das elektrische Zeigerwerk ist ähnlich eingerichtet wie der Zeichenempfänger des Zeigertelegraphen. Der Strom durchläuft den Elektromagnet, vor den Polen desselben befindet sich der bewegliche Anker; dieser trägt oben ein federndes Blech, das am Ende einen Haken hat und mit diesem in die

Zähne eines Steigrades eingreift. Wird der Anker angezogen, so zieht der Haken am Zahne und dreht das Rad um einen Zahn weiter; wird der Anker losgelassen, so wird er durch die Abreißfeder weggezogen, der Haken rutscht auf der schiefen Ebene des nächsten Zahnes aufwärts und schnappt in die nächste Lücke ein. So geht es fort. Stellschrauben begrenzen die Bewegung des Ankers. Hat nun das Steigrad auch 60 Zähne, so dreht es sich in 1 Minute einmal herum, und ein mit ihm verbundener Zeiger bewegt sich wie ein Sekundenzeiger. Macht man durch Räderübersetzung die Bewegung 60 mal und dann noch 12 mal kleiner, so erhält man auch die Bewegung des Minuten- und Stundenzeigers.

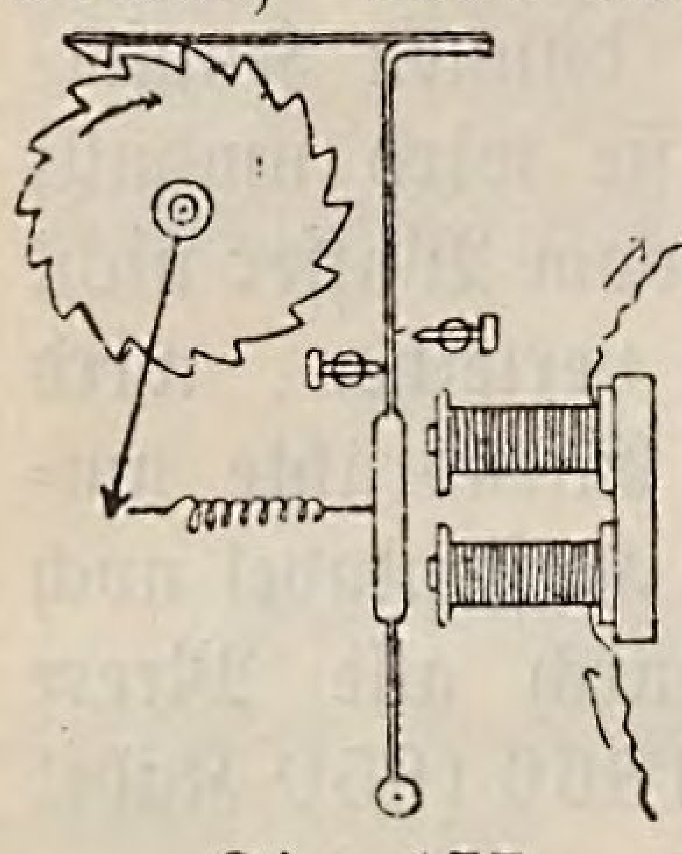


Fig. 177.

Will man nicht gerade die Sekunden übermitteln, sondern etwa nur die Minuten, oder bloß nach je 5 oder 10 Minuten den Strom schließen, so wählt man auf der Normaluhr ein Rad, das sich etwa in der Stunde 10 mal herumdreht, und schlägt auf ihm 6 Stifte ein, oder man schlägt auf dem Stundenrade 12 resp. 6 Stifte ein. Bringt man ferner einen Hebel so an, daß sein eines Ende von den sich drehenden Stiften nach aufwärts gedrückt wird, so wird sein anderes Ende nach abwärts gedrückt, berührt mit seiner Platinspitze ein federndes Blech und schließt dadurch den Strom. Ist der Stift am Hebelende vorbeigegangen, so wird es durch eine Abreißfeder wieder nach abwärts gezogen, bis der nächste Stift kommt und wieder einen Stromschluß bewirkt. So wird in regelmäßigen Zwischenräumen der Strom geschlossen.

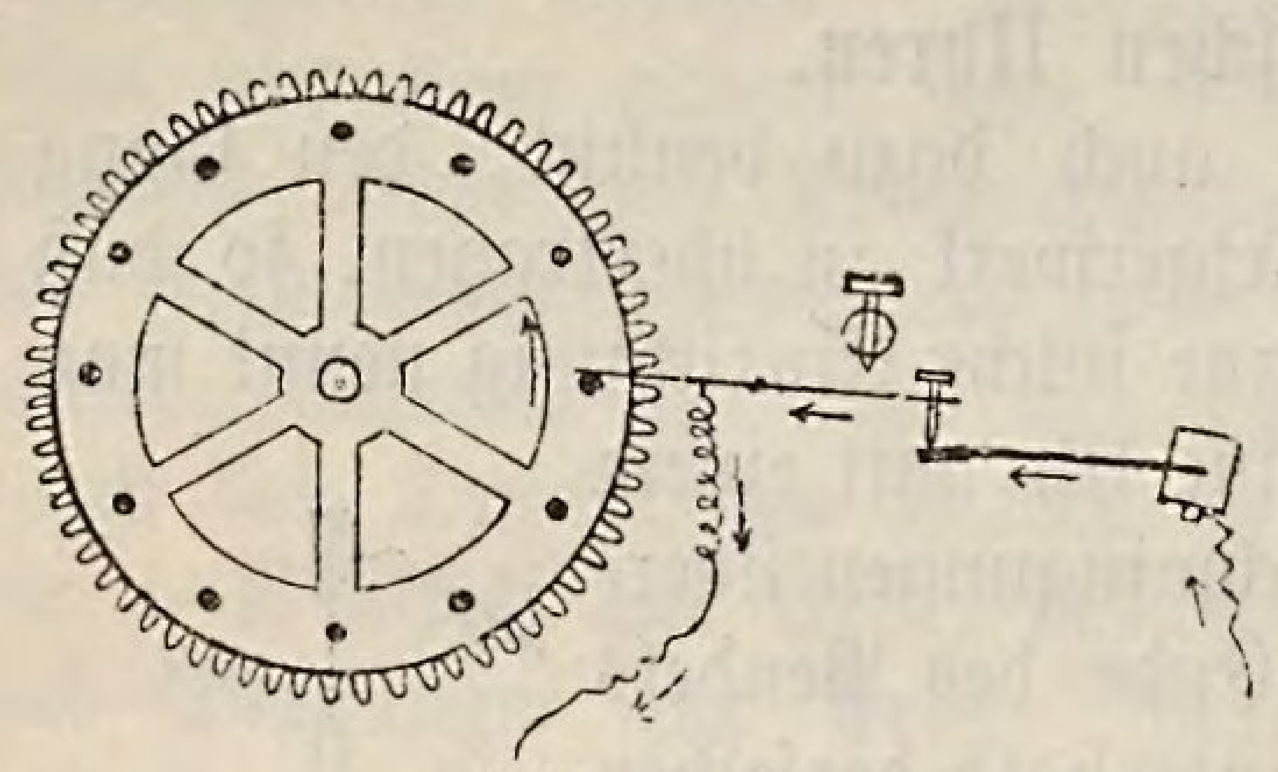


Fig. 178.

Der Zeichenempfänger ist ähnlich wie zuerst; man gibt dem Steigrad die passende Anzahl von Zähnen (60), so daß es in der entsprechenden Zeit (1 Std.) sich umdreht. Der Gang eines solchen elektrischen Zeigerwerkes ist kein kontinuierlicher, sondern der Zeiger bleibt während der Zeit von einem Stromschlusse bis zum folgenden ruhig und rückt dann plötzlich um viel weiter (1 Min., 5 Min., deshalb auch Springuhr genannt).

In Bahnhöfen, Städten, großen Fabriken, wo man gleichgehende Uhren an verschiedenen Stellen braucht, wendet man mit Vorteil solche elektrische Zeigerwerke an; man kann ja in den von der Normaluhr geschlossenen Stromkreis eine Anzahl von Zeigerwerken (wenn nötig mittels Relais) einschalten; sie alle haben dann übereinstimmenden Gang.

Chemische Wirkungen des galvanischen Stromes.

138. Elektrolyse.

Manche Flüssigkeiten leiten die Elektrizität. Ein- und Austritt des elektrischen Stromes in die Flüssigkeit geschieht stets nur unter chemischer Zersetzung der Flüssigkeit. **Eine durch den galvanischen Strom verursachte chemische Zersetzung einer Flüssigkeit in ihre einfacheren Bestandteile nennt man Elektrolyse.** Die beiden Drahtenden oder Metallplatten, durch welche der Strom in die Flüssigkeit geleitet wird, heißen Elektroden (Elektrizitätswege), die Platte, durch welche die +Elektrizität eingeleitet wird, die also mit dem +Pol der Batterie verbunden ist, heißt Anode (aufsteigender Weg), die andere, negative Platte, heißt Kathode (absteigender Weg). Der der Zersetzung unterliegende Körper heißt das Elektrolyt, die Zersetzungsprodukte heißen Jonen, **die Jonen kommen stets an getrennten Stellen zum Vorschein,** der an der Anode ausgeschiedene Stoff heißt Anion oder der elektronegative Bestandteil, weil er im Sinne des negativen Stromes wandert, der an der Kathode ausgeschiedene Stoff heißt Kation oder der elektropositive Körper, weil er im Sinne des +Stromes wandert. Diese Benennungen stammen von Faraday 1833.

139. Elektrolyse des Wassers.

Die einfachste Elektrolyse ist die des Wassers: Taucht man in dasselbe zwei Platinbleche als Elektroden, so **geschieht die Zersetzung des Wassers derart, daß der Sauerstoff an der Anode, der Wasserstoff an der Kathode zum Vorschein kommt:** beide können getrennt in pneumatischen Wannen aufgefangen werden.*) Man kann sich den Vorgang etwa auf folgende Art erklären: Durch die Kathode kommt die negative Elektrizität an der Grenze des Wassers an; durch ihren Einfluß wird die chemische Verwandtschaft von H_2 und O überwunden, H_2 und O werden von einander getrennt; dabei wird stets Elektrizität produziert, und zwar wird H_2+, O— elektrisch. H gleicht seine +E mit der —E der Kathode aus, wird frei und steigt als Gas in die Höhe, das O verbindet sich mit dem H_2 des nächstliegenden Wassermoleküls und gleicht seine —E mit dessen +E aus, dadurch wird das

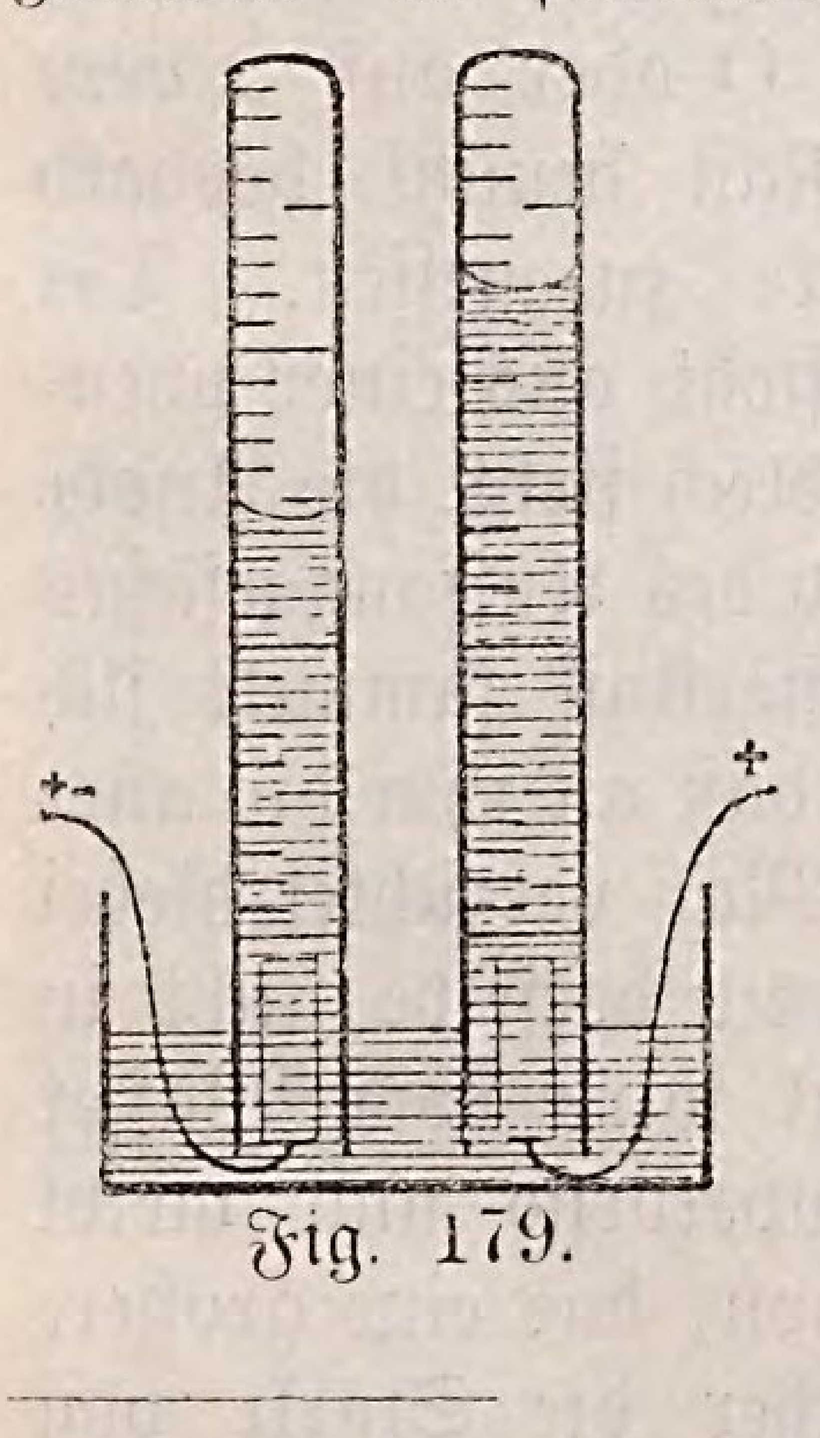


Fig. 179.

*) Die erste Wasserzersetzung beobachteten Nicholson und Carlisle, als sie (1800) bei einer Volta'schen Säule den vom Kupfer kommenden Draht in einen auf der obersten Zinkplatte liegenden Wassertropfen tauchten.

nächste O frei und — elektrisch, dies verbindet sich mit dem nächsten H_2 u. s. f., bis schließlich das letzte O mit —E geladen an der Anode anlangt, dort seine —E mit der +E der Anode ausgleicht und als freies Gas aufsteigt; es ist das ein ebensolcher Austausch (Wanderung) der einzelnen Bestandteile von Molekül zu Molekül wie bei den galvanischen Elementen. Ebenso wie bei den Elementen Elektrizität nur dadurch frei wird, daß die Zersetzungsprodukte an verschiedenen Stellen zum Vorschein kommen, also ein Teil gleichsam wandert, so **wird bei der Elektrolyse Elektrizität verbraucht, weil die Zersetzungsprodukte an verschiedenen Stellen zum Vorschein kommen.**

Durch Zerreißung von H_2O sind beide Teile elektrisch geworden und haben ihre Elektrizitäten mit denen der Elektroden ausgeglichen; es ist also von den Elektroden Elektrizität weggeschafft worden, gerade so, wie wenn diese Elektrizität durch die Flüssigkeit gewandert wäre. Jedes Molekül H_2 erhält bei der Elektrolyse eine gewisse Menge +Elektrizität, schafft also eine eben so große Menge —E von den Elektroden weg. Fließt von der Batterie immer neue Elektrizität zu den Elektroden, so dauert die Elektrolyse fort, und zwar für jede in die Flüssigkeit übertretende Elektrizitätsmenge. wird eine äquivalente Menge von H_2-molekülen frei. **Flüssigkeiten leiten die Elektrizität nur, wenn und weil sie vom Strom zersetzt werden** (De la Rive). Außer der Elektrizitätsbewegung durch die Jonen findet keine Elektrizitätsbewegung durch die Masse des Leiters ähnlich wie bei den Metallen statt. Daraus folgt: **die Menge der in die Flüssigkeit übertretenden Elektrizität, also die Stromstärke, ist proportional der Menge des ausgeschiedenen Wasserstoffes.** Für jedes Molekül H_2 wird auch ein Atom O ausgeschieden, deshalb sind auch die ausgeschiedenen Mengen H_2 und O einander chemisch äquivalent, auf 2 *g* H treffen 16 *g* O oder auf 2 *ccm* H trifft 1 *ccm* O, also 3 *ccm* Knallgas. Man benützt deshalb auch diese Wasserzersetzung, um die Stromstärke zu messen. Der dazu geeignete Apparat, das Voltameter, besteht aus einer pneumatischen Wanne, in der als Kathode ein Platinblech steht, die Anode steht im zweiten Auffanggefäß oder ist außerhalb des Auffanggefäßes gelegen. Der an der Kathode aufsteigende Wasserstoff sammelt sich in einem graduierten Glascylinder, so daß an ihm die ausgeschiedene Menge H abgelesen werden kann. Man verzichtet hiebei oft darauf, auch den Sauerstoff aufzufangen, weil derselbe nicht in ganzer Menge als Gas aufsteigt; denn ein Teil wird vom Wasser absorbiert; ein anderer Teil bildet Wasserstoffsuperoxyd und bleibt so auch in Wasser gelöst, und ein Teil bildet Ozon, das eine größere Dichte hat als Sauerstoff. Ein Strom, welcher die Stärke von 1 Ampère hat, zersetzt in der Minute 0,00552 *g* Wasser, also in der Stunde 0,331 *g* Wasser.

140. Elektrolyse von Salzen.

Ebenso wie Wasser lassen sich viele andere Stoffe elektrolytisch zersetzen, insbesondere die meisten Metallsalze, und am leichtesten die Salze der Schwermetalle, wobei diese Salze meist in Wasser gelöst sind. Wenn man den Strom z. B. durch eine Lösung von Kupfer- oder Zinksulfat oder Silbernitrat leitet, so wird das Salz zerlegt, das Metall wird an der Kathode ausgeschieden, das Säureradikal SO_4 oder NO_2 verbindet sich mit dem nächstliegenden Metallatom, dadurch wird dessen Säureradikal frei, dies wandert so fort, bis es an die Anode kommt, entreißt dort dem nächstliegenden Wassermoleküle den Wasserstoff und bildet damit freie Säure, während der Sauerstoff sich als freies Gas entwickelt. Stets scheidet sich an der Kathode das Metall, an der Anode die Säure aus.

Auch bei der Elektrolyse der Salze wird Elektrizität frei, das Metall wird + und heißt deshalb das positive Elektrolyt, das Säureradikal wird — und heißt das negative Elektrolyt; beide gleichen ihre Elektrizität mit der der Elektroden aus, so daß es so aussieht, als wenn von den Elektroden die Elektrizität in die Flüssigkeit ginge und sie durchsetzte. Da dabei das Metall aus der Flüssigkeit ausgeschieden wird, so wird die Flüssigkeit immer ärmer an Metallsalz und reicher an freier Säure und zwar von der Anode aus. Ist alles Metall aus der Flüssigkeit ausgeschieden, so beginnt eine einfache Wasserzersetzung, bei starken Strömen und kleinen Elektrodenflächen auch schon früher.

Ist bei der Elektrolyse eines Salzes als Anode nicht ein Platinblech, sondern eine Platte von demselben Metalle, welches als Salz in der Flüssigkeit gelöst ist, verwendet, ist also etwa eine Kupferanode in Kupfersulfatlösung, so verbindet sich das Säureradikal (SO_4), das an der Anode zum Vorschein kommen sollte, mit dem Metall (Cu) der Anode, löst also die Anode auf und bildet damit wieder dasselbe Salz (SO_4Cu), welches in der Flüssigkeit gelöst ist. In diesem Falle, bei löslicher Anode, bleibt die Flüssigkeit stets gleich reich an Salz, und **soviel sich an der Kathode Metall niederschlägt, ebensoviel wird von der Anode Metall weggenommen.** Ähnliches findet stets statt, wenn das Anodenmetall mit dem sich ausscheidenden Säureradikal eine lösliche Verbindung eingehen kann. Ist z. B. Kupferanode in Zinksulfatlösung, so wird an der Kathode Zn ausgeschieden, und an der Anode verbindet sich SO_4 mit Cu, so daß Zn aus der Lösung verdrängt und durch Cu ersetzt wird.

Davy entdeckte 1807 durch Elektrolyse die Metalle Kalium und Natrium. Man gräbt in ein Stück Ätzkali ein Loch, füllt es mit Quecksilber, in welches man den Kathodendraht taucht, und das Ätzkali stellt man in Quecksilber, in das man den Anodendraht taucht. Bei sehr starkem Strome geschieht die Zersetzung des Ätzkali in Ka und O. das

Kalium entsteht an der Kathode und bildet mit Quecksilber ein Amalgam, aus welchem es durch Destillation gewonnen werden kann.

Berzelius fand, daß bei Elektrolyse von manchen Salzen der Alkali- und alkalischen Erdmetalle sich H_2 und O ausscheiden, und daß daneben sich die Salze zerlegen in die Säure, welche an der Kathode, und in die basischen Stoffe (Hydroxyde), welche an der Anode sich ausscheiden.

Aluminium wird jetzt durch Elektrolyse der feuerflüssigen Thonerde gewonnen. Thonerde wird im Kohlentiegel sehr stark erhitzt, dann wird durch sie ein Strom geleitet, welcher die Thonerde zunächst bis zum Schmelzen erhitzt und dann zersetzt. An der oben befindlichen Kohlenanode scheidet sich Sauerstoff aus, der sich mit der Anode zu Kohlenoxydgas verbindet. An der Kathode scheidet sich Aluminium aus.

141. Das elektrolytische Gesetz.

Auch die Elektrolyse von Salzen benützt man zur Messung der Stromstärke; man benützt Kupfer- oder Zinksulfatlösung mit Kupfer- resp. Zink-anoden, oder Silbernitratlösung mit Silberanoden, bestimmt durch Wägung die Menge des an der Kathode niedergeschlagenen Metalles und schließt daraus auf die Stromstärke: 1 Amp. schlägt in einer Stunde 1,166 g Cu oder 3,974 g Ag nieder.

Faraday hat (1834) hierüber folgendes Gesetz gefunden: **Durch gleiche Stromstärke werden in gleichen Zeiten verschiedene Mengen von Stoffen ausgeschieden, welche sich verhalten wie die chemischen Äquivalentzahlen der ausgeschiedenen Stoffe.** Läßt man also gleiche Ströme oder denselben Strom durch einen Wasserzersetzungsapparat, eine Kupfer-, Silberlösung u. s. w. gehen, so verhalten sich die ausgeschiedenen Gewichtsmengen

$$H_2 : O : Cu : Ag_2 : Zn = 2 : 16 : 63{,}4 : 216 : 65{,}2.$$

Derselbe Strom, welcher in einer Stunde 1 g Wasserstoff ausscheidet, scheidet in einer Stunde 8 g Sauerstoff, 31,7 g Kupfer, 108 g Silber, 32,6 g Zink aus. In der Chemie nimmt man nun an, daß solche Mengen von Körpern, die sich wie die Äquivalentgewichte verhalten, also etwa 2 g H, 63,4 g Cu, 216 g Ag, gleich viele gleichwertige Moleküle enthalten; dann kann man sagen: **jedes Molekül eines jeden Körpers braucht zu seiner elektrolytischen Ausscheidung gleich viel Elektrizität,** oder jedes Molekül eines jeden Stoffes produziert bei seiner chemischen Ausscheidung gleichviel Elektrizität und neutralisiert demnach gleichviel Elektrizität im Strom.

142. Anwendung des elektrolytischen Gesetzes auf galvanische Elemente und Batterien.

Das elektrolytische Gesetz gilt auch in jedem galvanischen Elemente. Wenn sich in irgend einem Elemente, etwa dem Meidingerelemente 65,2 g Zn auflösen, so produzieren sie so viel Elektrizität, als 2 g H zum Freiwerden nötig haben, und

es werden im Element selbst 63,4 *g* Cu am Kupferblech ausgeschieden. Leite ich diesen Strom durch eine Kupferlösung, so werden darin auch 63,4 *g* Cu aufgelöst und abgesetzt, und wenn ich den Strom nacheinander durch mehrere Kupfer- oder Silberlösungen leite, so werden in jeder 63,4 *g* Cu oder 216 *g* Ag ausgeschieden, die genau den 65,2 *g* Zn entsprechen, welche sich im Elemente auflösen.

Ähnliches gilt auch von einer auf elektromotorische Kraft verbundenen Batterie. Betrachten wir das erste Element: es liefert eine Elektrizitätsmenge, welche der in Lösung gehenden Menge Zn entspricht (1 Amp. für je 0,0205 *g* Zn pro Min.). Vom + Pole läuft die Elektrizität zum — Pole des zweiten Elementes und dringt in die Flüssigkeit des zweiten Elementes ein; deshalb ist das Zink des zweiten Elementes Anode in Bezug auf den Strom des ersten Elementes, also löst sich Zink des zweiten Elementes auf in einer Menge, die der durchfließenden Elektrizitätsmenge entspricht (0,0205 *g* Zn pro Min. für je 1 Amp.), die also der gelösten Menge Zink des ersten Elementes gleich ist.

Die im ersten Elemente einer auf Intensität verbundenen Batterie erzeugte Elektrizität wird also durch den Durchgang durch das zweite Element weder vermehrt noch vermindert, sondern bleibt der Quantität nach dieselbe; wohl aber wird sie verstärkt, wie wir bald sehen werden. Dasselbe gilt von allen folgenden Elementen. Sind also beliebig viele, der Art und Größe nach sogar beliebig verschiedene Elemente in demselben Stromkreise auf Intensität verbunden, so ist die im Stromkreise zirkulierende Menge Elektrizität nur so groß, als der in einem Elemente sich auflösenden Menge Zink entspricht, und in jedem Elemente wird gleich viel Zink gelöst. Leitet man den Strom der Batterie durch einen Silbervoltameter oder Wasserzersetzer &c., so entspricht die Menge des niedergeschlagenen Silbers &c. der Menge des in einem Elemente sich auflösenden Zinkes, also 0,06624 *g* Ag oder 0,00552 *g* Wasser oder 0,00492 O oder 0,0006 H pro Min. für jedes Ampère.

Diese Sätze sind selbstverständlich nur dann richtig, wenn man diejenige Menge Zink, welche in einem Elemente „unnütz" verbraucht wird, also keine Elektrizität erzeugt, deren zugehöriger H nicht wandert, außer Acht läßt, also nur diejenigen Mengen Zn betrachtet, welche wirklich Elektrizität liefern.

Sind die Elemente auf Quantität geschaltet, so läuft sämtliche in den einzelnen Elementen produzierte Menge Elektrizität durch denselben Draht; die Stromstärke entspricht der Summe all der Zinkmengen, welche in den einzelnen Elementen gelöst werden; im Voltameter scheidet sich deshalb eine dieser Gesamtmenge entsprechende Menge Elektrolyt aus, und es ist wohl möglich, daß in den einzelnen Elementen in gleichen Zeiten verschiedene Mengen Zn gelöst werden.

143. Polarisationsstrom.

Bei der Elektrolyse tritt stets eine elektromotorische Kraft auf, welche dem zersetzenden Strome entgegenwirkt, ihn also schwächt. Leitet man den Strom einer Batterie durch einen Wasserzersetzer, so schaltet man zunächst einen Widerstand ein in Form des Wassers und schwächt dadurch den Strom. Aber durch das Zersetzen des Wassers in H_2 und O wird auch noch eine elektromotorische Kraft thätig; diese bewirkt, daß dort, wo H_2 auftritt, also an der Kathode ein positiver Pol und an der Anode ein negativer Pol entstehen würde; der hiedurch entstehende Strom läuft demnach dem ursprünglichen Strom entgegen, schwächt ihn also. Man nennt diesen Strom den Polarisationsstrom; er wurde zuerst von Ritter (1803) entdeckt und kann leicht nachgewiesen werden.

Wenn man nämlich als Elektroden in Wasser zwei Platinbleche benützt und den Strom durchgehen läßt, so bleiben von den ausgeschiedenen Gasen H_2 und O kleine Mengen am Platin haften. Entfernt man nun den ursprünglichen primären Strom und verbindet die Platinbleche mit einem Galvanometer (indem man das Drahtstück ab rasch nach ac verlegt), so erkennt man das Vorhandensein eines kräftigen Stromes, des sekundären oder Polarisationsstromes; er wird bald schwächer und hört ganz auf. Er läuft so, als wäre das Blech, welches als Kathode gedient hat, nun der negative Pol; wo also zuerst die negative Elektrizität hineinlief, da

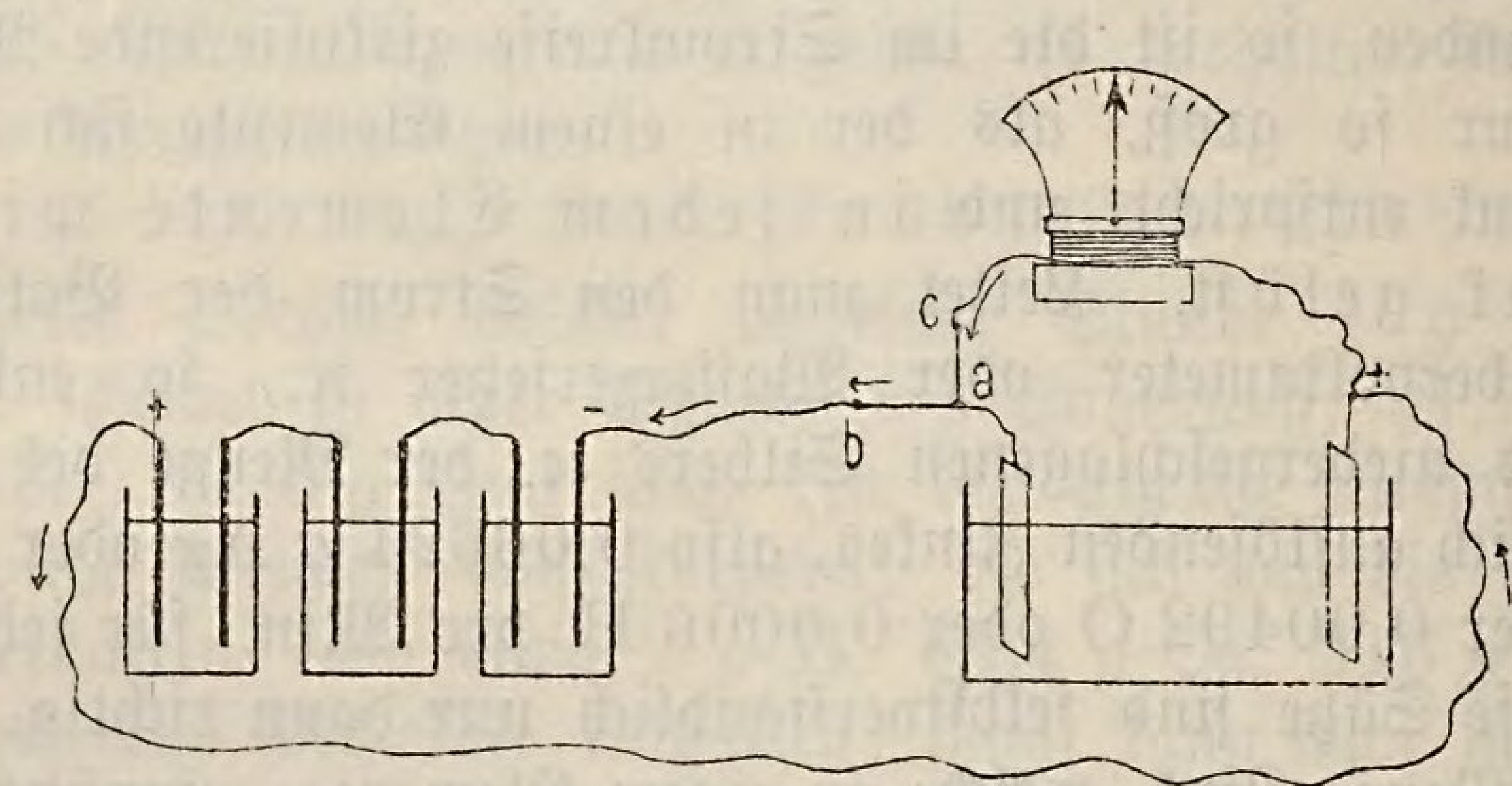


Fig. 180.

läuft sie beim Polarisationsstrom heraus. **Die Richtung des Polarisationsstromes ist der des ursprünglichen entgegengesetzt.** Das am Platin anhaftende H_2 wirkt elektromotorisch wie das Zink eines Elementes; auch hiebei geht ein chemischer Prozeß vor sich, indem das am Platin anhaftende H_2 durch Vermittelung des Wassers wandert und sich mit dem an der Anode anhaftenden O verbindet. Der Polarisationsstrom entsteht also durch Wiedervereinigung von H_2 und O.

Geht der Strom durch den Wasserzersetzer, so ist der Polarisationsstrom eigentlich nicht vorhanden, wohl aber die elektromoto-

rische Kraft, welche der durch die Vereinigung von H_2 und O entstehende Polarisationsstrom hat; diese elektromotorische Kraft wirkt im entgegengesetzten Sinne wie die der Batterie, folglich schwächt sie die el. Kr. der Batterie um den Betrag der el. Kr. des Polarisationsstromes. Es zeigt sich das am Gefälle, das auf dem metallischen oder flüssigen Leiter ein kontinuierliches ist, beim Übergang vom metallischen Leiter in die Flüssigkeit aber einen Sprung macht, einen Absprung, der auf einmal ein ganzes Stück des Gefälles verbraucht. So fließt, wie in Fig. 181 angedeutet ist, die Elektrizität mit mäßigem Gefälle durch den Draht, geht an der Anode in die Flüssigkeit, hat dort etwa ein stärkeres Gefälle, macht nun beim Austritt an der Kathode einen Sprung in ihrer Spannung von entsprechendem Betrage und fließt dann mit

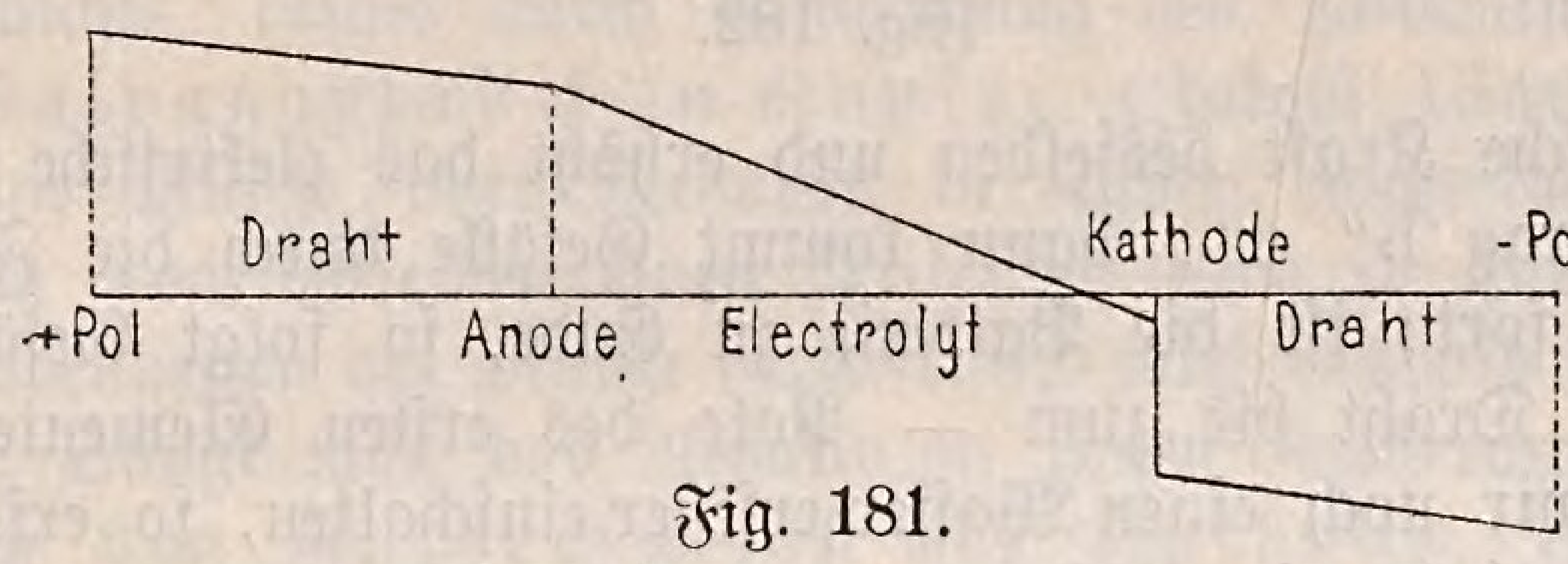


Fig. 181.

mäßigem Gefälle zum — Pole. Ob hiebei der Sprung an der Kathode, oder an der Anode, oder an beiden geschieht, weiß man nicht. Es schaut demnach so aus, als wenn der ganze Betrag der durch die Batterie hervorgebrachten Spannungsdifferenz, welche sich dann im Gefälle ausgleichen soll, sich vermindert hätte um den Betrag der plötzlichen Abnahme.

Dieser Absprung ist also ein Verlust an dem durch die Batterie hervorgebrachten Potenzial. Dieser Betrag elektrischer Kraft wird aber gerade dazu verwendet, um die chemische Verwandtschaft von H_2 und O zu lösen; es bedarf einer Arbeit, sogar einer großen, die chemisch verbundenen Moleküle H_2 und O zu trennen, und diese Arbeit wird geleistet von der Elektrizität, indem sie einen Teil ihres Potenzials dazu verwendet.

144. Polarisation bei Elementen.

Ein solcher Sprung im Gefälle, wie wir ihn eben bei der Elektrolyse gesehen haben, findet in ähnlicher Art auch bei jeder auf elektromotorische Kraft zusammengesetzten Batterie statt. Durch das erste Element (Fig. 182) wird eine Potenzialdifferenz geschaffen an der Grenzfläche von Zink und Flüssigkeit; die + Elektrizität geht mit Gefälle durch die Flüssigkeit des Elementes und durch den Verbindungsdraht zum Zink des zweiten Elementes; dort wirkt die elektromotorische Kraft des zweiten Zinkes

und erhöht dies elektrische Potenzial um den Betrag b′ c′ (= bc), wenn das zweite Element dieselbe elektromotorische Kraft hat wie das erste); dann folgt Gefälle durch die Flüssigkeit und den Verbindungsdraht bis zum — Pole des dritten Elementes, dort wirkt die

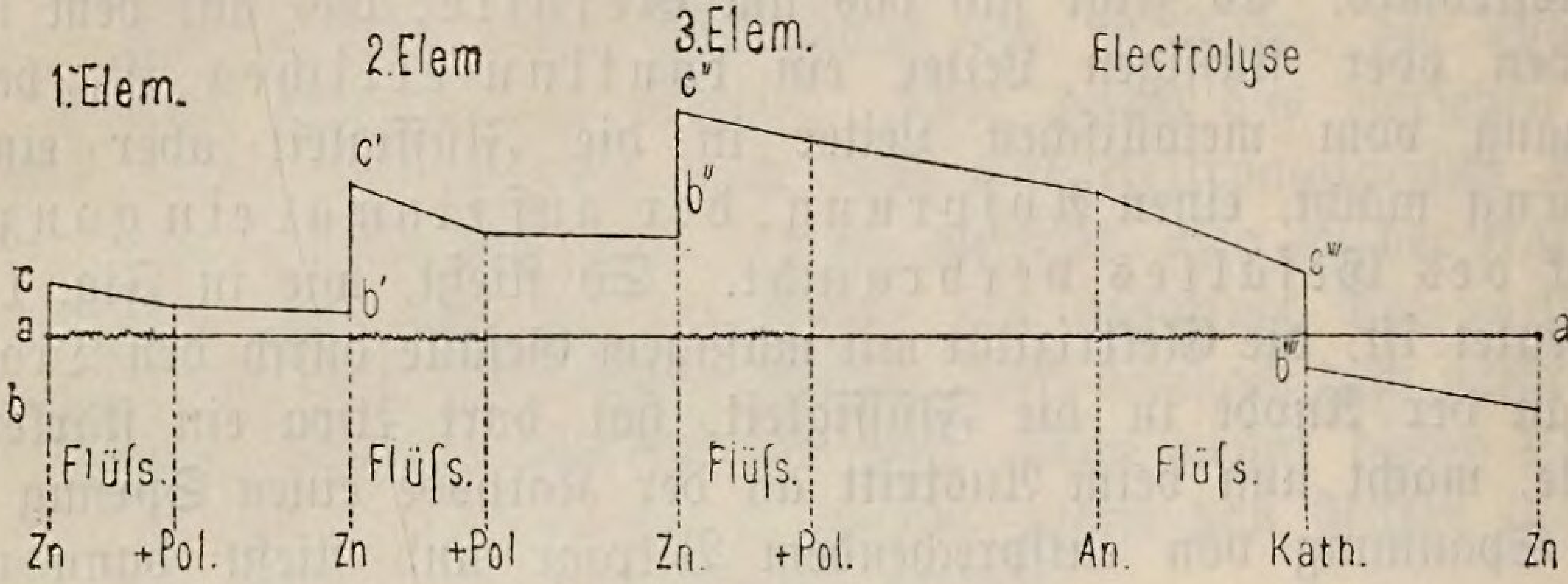


Fig. 182.

elktromotorische Kraft desselben und erhöht das elektrische Potenzial um den Betrag b″ c″; dann kommt Gefälle durch die Flüssigkeit. So geht es fort; ist die Batterie zu Ende, so folgt Gefälle durch den äußeren Draht bis zum — Pole des ersten Elementes zurück; oder wenn wir noch einen Wasserzersetzer einschalten, so erfolgt etwa an dessen Kathode ein Absprung des elektrischen Potenzials vom Betrage c‴ b‴. Es schaut demnach so aus, als ob in diesem Stromkreise vorhanden wäre eine elektromotorische Kraft gleich der Summe der elektromotorischen Kräfte der Elemente, vermindert um die elektromotorische Kraft des Wasserzersetzers. Ohm drückt dies Gesetz so aus: **Sind in einem Stromkreise mehrere elektromotorische Kräfte thätig, so ist die elektromotorische Kraft des Stromes gleich der algebraischen Summe sämtlicher elektromotorischen Kräfte,** wobei die in dem einen Sinne wirkenden Kräfte als +, die in dem andern Sinne wirkenden Kräfte als — anzusetzen sind, *die Aufeinanderfolge der Kräfte aber eine beliebige ist.* In jedem Elemente geschieht eine chemische Verbindung, es verschwindet chemische Verwandtschaft, dafür wird eine elektrische Potenzialdifferenz hergestellt, oder eine schon vorhandene erhöht. Bei jeder Elektrolyse wird eine chemische Verbindung gelöst, es wird chemische Verwandtschaft hergestellt, dazu wird elektrische Kraft verbraucht, d. h. eine vorhandene elektrische Potenzialdifferenz wird verbraucht, und so entsteht der Absprung im Gefälle.

Wenn bei der Elektrolyse eines Metallsalzes *die Anode aus dem entsprechenden Metalle besteht,* sich also auflöst, und demnach keine neuen Stoffe ausgeschieden werden, sondern bloß durch den Strom ein Metall, z. B. Kupfer von der Anode losgelöst und durch Vermittlung der Flüssigkeit an die Kathode angesetzt wird, so *kommt keine elektromotorische Kraft zum Vorschein,* die elektromotorische Kraft der Batterie wird nicht geschwächt, es

findet kein Absprung im Gefälle statt; denn es wird hiebei keine chemische Verbindung gelöst, sondern es findet nur ein gegenseitiger Austausch derselben Stoffe von Molekül zu Molekül statt. Es genügt in diesem Falle die geringste elektromotorische Kraft, um die Elektrolyse hervorzubringen.

145. Galvanoplastik. Herstellung dicker Metallniederschläge.

Von der Elektrolyse macht man sehr wichtige Anwendung in der Galvanoplastik; sie zerfällt in zwei Teile, 1) die eigentliche Galvanoplastik, die Herstellung dicker Metallniederschläge, um einen Gegenstand in Metall abzuformen, 2) die Galvanostegie, das Überziehen eines Gegenstandes mit einer dünnen festhaftenden Metallschichte, beides durch Anwendung des galvanischen Stromes.

Galvanoplastik in Kupfer. (Jakobi 1840). Will man etwa eine Münze oder Medaille in Kupfer nachbilden, so macht man sich von derselben einen Abdruck etwa in Blei; er enthält die Erhabenheiten der Münze vertieft und wird deshalb das Negativ genannt. Hängt man das Negativ an einem Kupferdrahte in eine Lösung von Kupfersulfat als Kathode, ihm gegenüber als Anode ein Kupferblech und schließt den Strom, so löst sich Kupfer von der Anode und schlägt sich auf dem Blei als metallischer fester Niederschlag ab, der immer dicker wird. Ist er stark genug, so kann man das Blei (durch Ausschmelzen) entfernen, und das Kupfer ist dann ein getreues Abbild der Münze.

Meistens benützt man nicht eine eigene Batterie, welche vom Kupferbad getrennt ist, sondern eine Abänderung des Daniellschen Elements. Man füllt einen großen Trog (Steingut oder Holz mit Blei ausgeschlagen), mit Kupfervitriollösung, die mit etwas Schwefelsäure angesäuert ist, stellt in ihn ein oder mehrere Thonzellen mit Schwefelsäure und den Zinkblöcken. Die Zinkblöcke werden durch Drähte mit einem Kupferstab verbunden, und von diesem aus hängt das Negativ in die Kupfervitriollösung. So stellt das ganze gleichsam ein Daniellsches Element vor, Zink löst sich auf, Kupfer wird an den hineingehängten Negativen niedergeschlagen. Von Zeit zu Zeit (alle Tage 2 mal) werden die Thonzellen entleert und mit frischer Schwefelsäure gefüllt; da Kupfersulfat verbraucht wird, so werden Krystalle desselben in Roßhaarsäckchen in das Bad gehängt; sie lösen sich auf und halten so das Bad gesättigt.

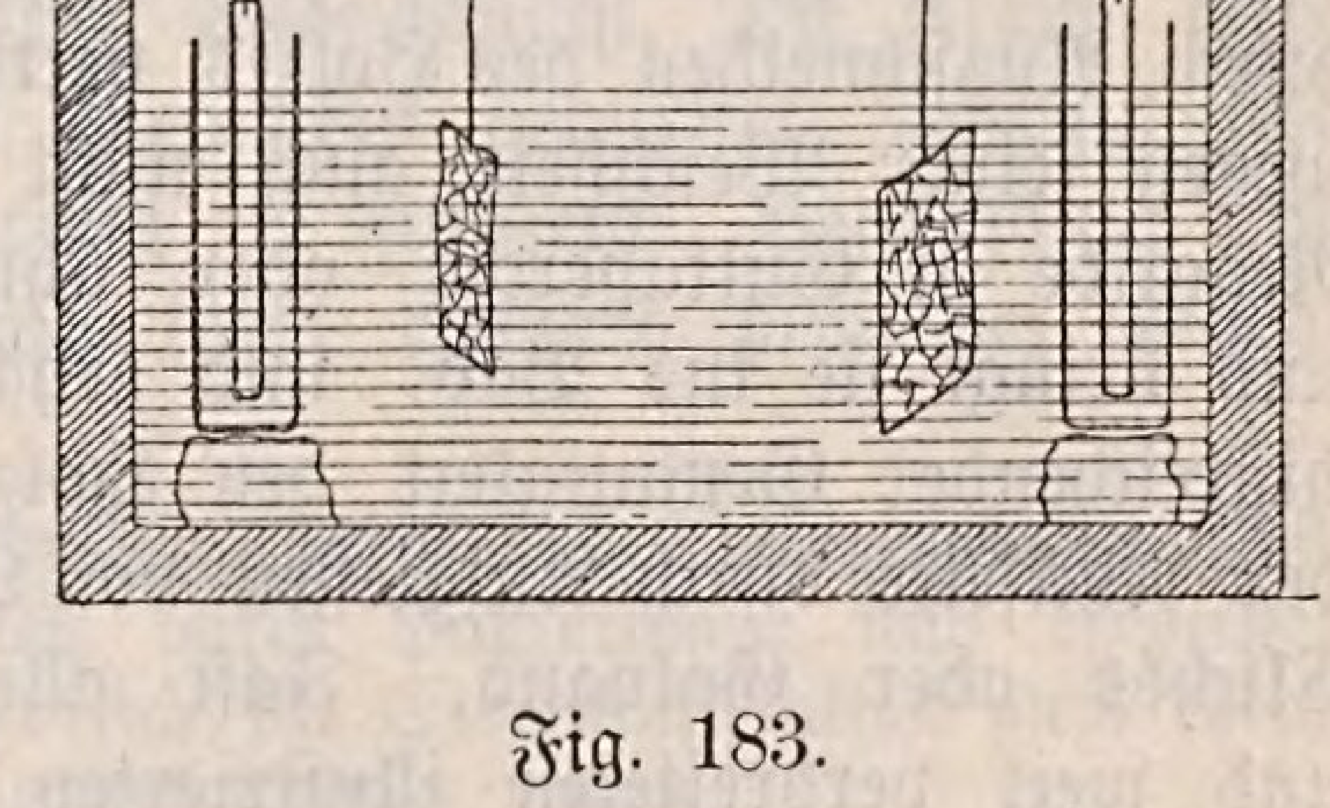


Fig. 183.

Um von dem abzubildenden Gegenstande einen guten Abdruck herzustellen, verwendet man leichtflüssige Metalle, Wachs, Stearin, Gips, der nach dem Trocknen in heißes Wachs gelegt wird, besonders aber Guttapercha, das durch Erwärmen in heißem Wasser weich und bildsam wird, sich leicht auf jeden Gegenstand aufdrücken läßt, beim Erkalten wieder hart wird und nun vom Gegenstande abgenommen werden kann. Bei nichtmetallischen Stoffen muß die Fläche, auf der sich Kupfer niederschlagen soll, leitend gemacht werden; dies geschieht durch Bestreichen und Einreiben der Fläche mit fein geschlämmtem Graphit oder feinem Bronzepulver.

Auf diese Weise macht man Kopien von Münzen, Medaillen, Schmuckgegenständen, metallenen Geräten, wie schön gearbeiteten Tellern Platten, Bechern, Beschlägen 2c.

Vervielfältigung von Kupferstichplatten. Die gestochene Kupferplatte, welche mit all den vertieften Linien versehen ist, welche im Bilde schwarz erscheinen sollen, benützt man nicht zum Drucke, weil der starke Druck der Druckerpresse die feinen Linien im weichen Kupfer bald stumpf und undeutlich machen würde, sondern man verschafft sich von ihr zuerst ein Negativ, das die vertieften Linien der Kupferplatte erhöht enthält, und zwar auf galvanischem Wege. Man überzieht die Platte auf der Rückseite mit Wachs, reibt sie vorn mit Fett ein, das dann wieder möglichst entfernt wird, und hängt sie ins Bad, so schlägt sich auf der Vorderseite Kupfer nieder; hat der Niederschlag hinreichende Stärke erlangt, so löst man ihn vom Original, und hat ein vollkommen getreues Negativ. Da das Original dadurch nicht abgenützt wird, so kann man sich nach Bedarf beliebig viele Negative verschaffen. Jedes Negativ wird nun ebenso behandelt, rückwärts mit Wachs überzogen und ins Bad gebracht; der Kupferniederschlag, der sich dann leicht vom Negativ trennen läßt ist nun ein vollständig getreues Abbild der Originalplatte. Die galvanischen Kopien werden nun zum Abziehen der Bilder benützt; sie sind so getreu, daß die von ihnen gelieferten Bilder sich von denen der Originalplatte nicht unterscheiden lassen.

Vervielfältigung von Holzschnitten. Ist das Holz geschnitten, d. h. sind alle Striche, die im Bilde schwarz erscheinen sollen im Holze erhaben stehen gelassen, also die weißen Stellen durch Ausschneiden des Holzes vertieft, so benützt man den Holzstock wegen seiner Weichheit auch nicht zum Druck, sondern macht sich Negative in Guttapercha oder ähnlichen Stoffen, macht sie leitend und bringt sie ins Bad, und erhält so kupferne Kopien, die mit hinreichender Genauigkeit den Holzschnitt ersetzen. Sie werden auf der Rückseite durch Aufgießen von Letternmetall verstärkt und heißen Clichés oder Galvano. Fast alle Abbildungen in den bekannten und weit verbreiteten illustrierten Zeitschriften [Gartenlaube, Über

Land und Meer, Illustrierte Zeitung Fliegende Blätter 2c.] sowie in den Büchern sind Holzschnitte, die galvanoplastisch vervielfältigt sind, und nur wegen der Billigkeit und Schnelligkeit dieser galvanoplastischen Vervielfältigung ist es möglich, diese Zeitschriften in so vielen Exemplaren abzudrucken und zu so geringem Preise zu liefern.*)

146. Herstellung dünner Metallniederschläge.

Die Galvanostegie oder galvanische Metallisierung wird angewandt, um einen metallenen Gegenstand mit einer dünnen Schichte eines edleren Metalles zu überziehen, um ihm ein schöneres Aussehen zu geben oder ihn gegen Rost zu schützen. Am gebräuchlichsten sind:

a) Das galvanische Versilbern: ein passendes Bad macht man aus 10 *l* destilliertem Wasser, darin löst man 250 *g* Cyankalium auf und fügt 100 *g* Silber (in Silbernitrat verwandelt und dann in etwas Wasser aufgelöst) hinzu. Es findet Wechselzersetzung statt, indem sich Kaliumnitrat und Cyansilber bildet, welch letzteres in dem überschüssig vorhandenen Cyankalium gelöst bleibt.

Man versilbert mit einer Batterie, indem man den Gegenstand als Kathode und ein Silberblech als Anode ins Bad bringt. Das Bad bleibt gesättigt, da sich von der Anode so viel Silber löst als sich an der Kathode niederschlägt. Die Versilberung gelingt leicht und reichlich bei mäßigem Strome als festhaftender Silberüberzug, der mattglänzend ist, da er aus einzelnen Silberkrystallen besteht. Der Gegenstand wird mit Messingdrahtbürsten (Kratzbürsten) gekratzt, damit er glänzend wird, und dann mit dem Polierstahl oder Polierstein (Blutstein) geglättet und spiegelnd gemacht (poliert.)

Auf solche Weise werden viele Gegenstände aus unedlem Metalle (Messing) hergestellt und dann versilbert, wie Löffel, Gabeln, Kaffeekannen Zuckerbüchsen, Leuchter, Tafelaufsätze.

Teig- oder Pastenversilberung: man verreibt 300 *g* Kochsalz, 200 *g* Weinstein und 60 *g* Chlorsilber trocken zu feinem Pulver, rührt beim Gebrauch eine kleine Menge mit etwas Wasser zu einem Brei an, bestreicht damit mittels eines Pinsels den zu versilbernden kupfernen oder messingenen Gegenstand, so tritt an dessen Oberfläche ein Austausch ein, indem sich etwas Kupfer auflöst und dafür Silber sich metallisch niederschlägt. Die Fläche wird dann mit Wasser gewaschen, mit Weinstein gebürstet, gekratzt und wenn nötig poliert. Die Versilberung ist glänzend, gleichmäßig und ungemein billig, aber schwach und kann deshalb bloß bei Gegen-

---

*) Dies Verfahren wird verdrängt durch das Stereotypieren (Abformen des Satzes nebst Holzschnitten durch Papiermasse und Abgießen dieser Matrizen in Letternmetall), da sich die Stereotypplatten auch cylindrisch herstellen lassen und für Rotationsmaschinen passen.

ständen angewandt werden, die der Abnützung nicht ausgesetzt sind. So werden z. B. die Räder der Taschenuhren, sowie die Träger derselben zuerst versilbert, dann vergoldet.

b) Vergolden. (Zuerst gefunden von de la Rive 1841). Es gibt eine große Anzahl von Vorschriften für Vergoldungsbäder. Ein kalt angewandtes Bad hat folgende Zusammensetzung. Wasser 1 *l*, Cyankalium 40 *g*, Gold 10 *g* (in Chlorid verwandelt), Ammoniak 2 *g*.

Ein warm (bei 60—80°) angewandtes Bad hat folgende Zusammensetzung: In 8 *l* Wasser werden 600 *g* krystallisiertes phosphorsaures Natrium gelöst, in 1 *l* Wasser werden 10 *g* Gold (als Chlorid) gelöst und beide Lösungen gemischt. In 1 *l* Wasser löst man 100 *g* zweifach schwefligsaures Natrium und 15—20 *g* Cyankalium nnd fügt diese Lösung zu der zuerst bereiteten.

Als Anoden verwendet man entweder Goldblech, von dem sich beim Stromschlusse Gold im Bade auflöst, jedoch meist nicht so viel, als sich an der Kathode niederschlägt, weshalb das Bad sich erschöpft; oder man nimmt ein Platinblech, von welchem sich nichts ablöst, so daß sich das Bad erschöpft; es wird dann durch weiteren Zusatz von Goldsalz wieder aufgebessert, oder durch ein neues ersetzt. Gold kann man galvanisch in verschiedenen Farbennüancen niederschlagen, von ganz hellgelb bis tief dunkelgelb; es hängt dies von der Stromstärke, der Oberfläche des zu vergoldenden Gegenstandes, der Temperatur und dem Goldgehalt des Bades ab, so daß es ziemlich schwierig ist, eine gewünschte Farbe des Goldes zu erhalten. Auch das Gold scheidet sich in feinen Krystallen aus, erscheint deshalb matt, wird mit der Kratzbürste glänzend und mit dem Polierstein spiegelnd gemacht. Oft will man einen Gegenstand teilweise versilbern und teilweise, z. B. einige auf ihm angebrachte Ornamente oder Teile von solchen, vergolden; man versilbert dann den Gegenstand zunächst ganz, deckt diejenigen Stellen, die Silber bleiben sollen, mit einem guten Lack, läßt trocknen und bringt dann ins Goldbad, wo sich dann die nicht lackierten Teile vergolden.

c) Verkupfern. Eisen und Zink lassen sich nicht gut direkt versilbern oder vergolden, man muß sie zuerst verkupfern, und auch sonst will man manche aus Eisen oder Zink gefertigte Gegenstände verkupfern, um ihnen ein schöneres Aussehen zu geben oder sie gegen Rost zu schützen. Man benützt als Anode einer starken Batterie ein Kupferblech in folgendem Bade. Man löst in 20 *l* Regenwasser 300 *g* schwefligsaures Natrium und 500 *g* Cyankalium, löst in 5 *l* Wasser 350 *g* essigsaures Kupfer und 200 *g* Ammoniak und mischt nun beide Flüstigkeiten, wobei sie sich vollständig entfärben.

d) Kupferne und eiserne Gegenstände (eisernes Küchengeschirr, Eisendraht) werden oft auch verzinnt; ein Bad, das meist heiß

angewandt wird, ist folgendes: 300 *l* Regenwasser, 3 *kg* Weinstein, 300 *g* Zinnchlorür.

Man verzinnt mittels einer Batterie und Zinnanode oder auf folgende einfachere Art: man umwickelt den zu verzinnenden Gegenstand mit etwas Zinkdraht oder Zinkstreifen, die ihn an einigen Punkten berühren, und legt ihn so ins heiße Zinnbad. Das ganze wirkt nun selbst wie ein Element, in dem das Zink das Bad zersetzt, sich auflöst, und dafür das Zinn ausscheidet und zwar am umwickelten kupfernen Gegenstand, der so die Stelle des positiven Poles spielt (wie das Kupferblech des Daniellschen Elementes). Ein ähnliches Verfahren wendet man auch oft beim Versilbern und Vergolden an; man bewickelt den Gegenstand mit etwas Zinkdraht und bringt ihn ins Silber- oder Goldbad; Zink löst sich auf, Silber oder Gold schlägt sich nieder und zwar an dem mit dem Zink verbundenen Gegenstand.

e) Vernickeln: Man verwendet als Bad eine gesättigte Lösung von schwefelsaurem Nickeloxydul, als Anode ein Nickelblech, und vernickelt Gegenstände aus Kupfer, Messing und Eisen, insbesondere feinere Maschinenteile, um ihnen ein gefälligeres Äußere zu geben und sie vor Rost zu schützen. Bei Anwendung eines starken Stromes schlägt sich das Nickel weiß, hart, glänzend und festhaftend nieder und wird dann noch poliert.

Man kann auch galvanische Niederschläge erzielen von Platin Blei, Kobalt, Eisen ꝛc., jedoch werden dieselben wenig angewandt.

Ebenso wie bei der Teigversilberung die Silberausscheidung bloß ein einfacher chemischer Austausch bei Berührung (Kontaktmetallisierung) und nicht die Wirkung eines galvanischen Stromes ist, da das Silber an derselben Stelle sich absetzt, an der das Kupfer sich löst, so hat man noch mehrere ähnliche Arten von nasser Metallisierung. Die Eintauchverkupferung: Man löst 100 *g* Kupfervitriol und 100 *g* engl. Schwefelsäure in 5 *l* Wasser, taucht Eisen oder Stahl, blank geputzt, einige Augenblicke hinein, so löst sich etwas Eisen und schlägt sich etwas Kupfer nieder. Der Überzug ist glänzend, gleichmäßig und haftend, wenn man den Gegenstand nur sehr kurze Zeit eintaucht und dann rasch mit Wasser abspült; er schützt aber keineswegs vor dem Rosten, befördert dasselbe sogar, dient also bloß dazu, dem Eisen ein schöneres Aussehen zu geben. Man verkupfert so besonders die Sprungfedern der Betten und Polstermöbel und nennt sie dann „galvanisiert“.

Das Weißsieden: Man verreibt 250 *g* Kochsalz, 250 *g* Weinsteinrahm mit 3 *g* Silber (in Chlorsilber verwandelt), gibt einen Löffel voll in einen Kessel kochenden Wassers und siedet darin messingene Gegenstände (Knöpfe, Hosenträgerschnallen, Kleiderhaften, Stecknadeln u. s. w.), so schlägt sich auf ihnen ein ungemein dünner

Silberüberzug nieder, der ihnen ein besseres Aussehen verleiht, beim Gebrauche aber sofort verschwindet.

Achter Abschnitt.

Induktions-Elektrizität.

147. Fundamental-Versuche und -Gesetze.

Wie wir sahen, unterscheiden sich Reibungs- und galvanische Elektrizität in ihrem Wesen und in ihrer Wirkung nicht, sondern nur in ihrer Entstehungsart und Entstehungsursache. Allerdings ist für besondere Arten von Wirkungen, wie etwa für die Wirkungen eines Stromes von gleichmäßiger Stärke, die durch Reibung erhaltene Elektrizität nicht, die galvanische Elektrizität dagegen vorzüglich geeignet. Außer diesen zwei Arten gibt es noch eine dritte Art, Elektrizität hervorzurufen, und diese nennt man Induktion; die auf solche Weise hervorgebrachte Elektrizität heißt Induktionselektrizität. Auch sie ist nur durch die Art der Entstehung, nicht durch Wesen und Wirkung von der Reibungs- und galvanischen Elektrizität verschieden, doch werden wir auch sehen, daß besondere Arten von Wirkung gerade durch die Induktionselektrizität besonders gut hervorgebracht werden können.

Die Induktionselektrizität wird nach folgendem Gesetze hervorgebracht. **Wird ein Teil eines geschlossenen Leiters einem Teil eines galvanischen Stromes genähert, oder von ihm entfernt, so entsteht jedesmal in dem geschlossenen Leiter ein elektrischer Strom, der Induktionsstrom.**

Die Richtung des Induktionsstromes ist stets eine solche, daß durch die Einwirkung des induzierten Stromes auf den induzierenden nach den Ampèreschen Gesetzen die Bewegung verlangsamt würde (Gesetz von Lenz); es hat also der beim Annähern induzierte Strom die entgegengesetzte Richtung, wie der induzierende, so daß diese beiden, in entgegengesetzter Richtung laufenden Ströme sich abstoßen, demnach die Bewegung des Annäherns verlangsamen würden; es hat ferner der beim Entfernen induzierte Strom die gleiche Richtung wie der induzierende Strom, so daß also die beiden in gleicher Richtung laufenden Ströme sich anziehen, also die Bewegung des Entfernens verlangsamen würden.

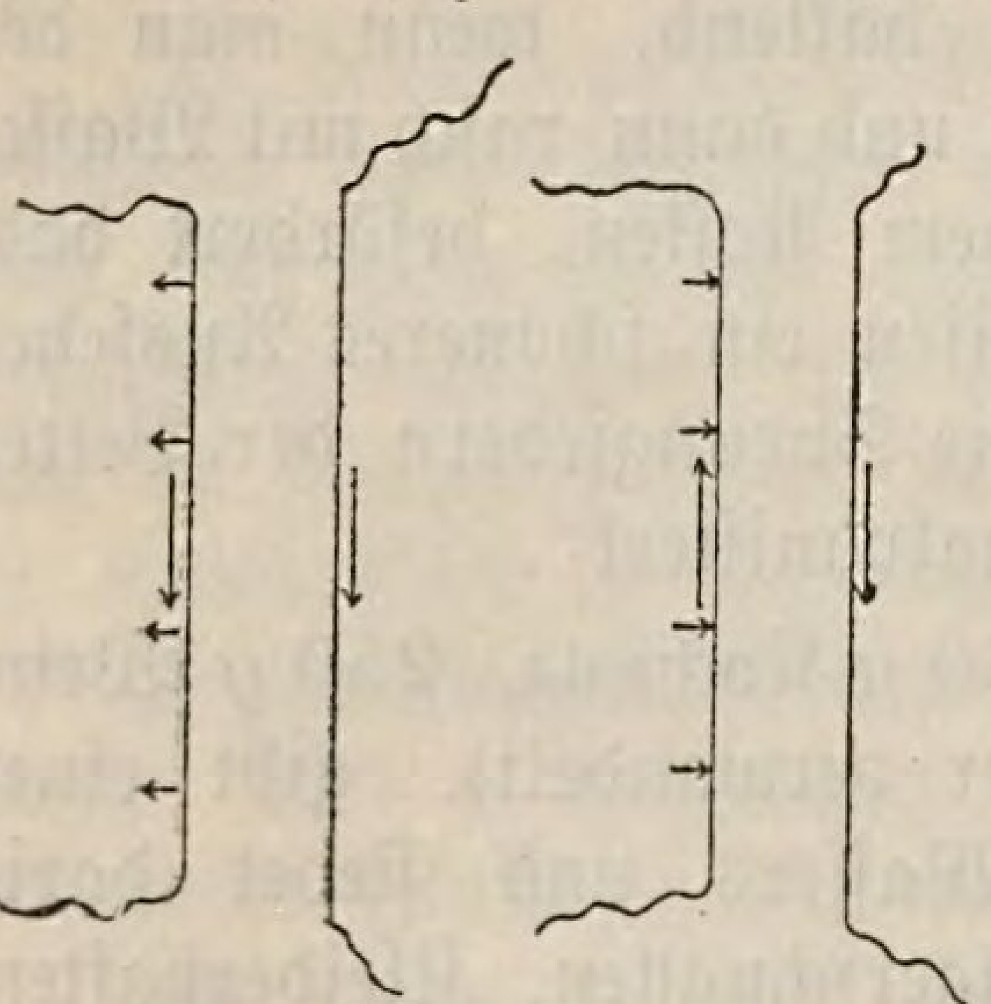


Fig. 184.

Man erregt diese Induktionsströme und weist sie leicht nach auf folgende Art.

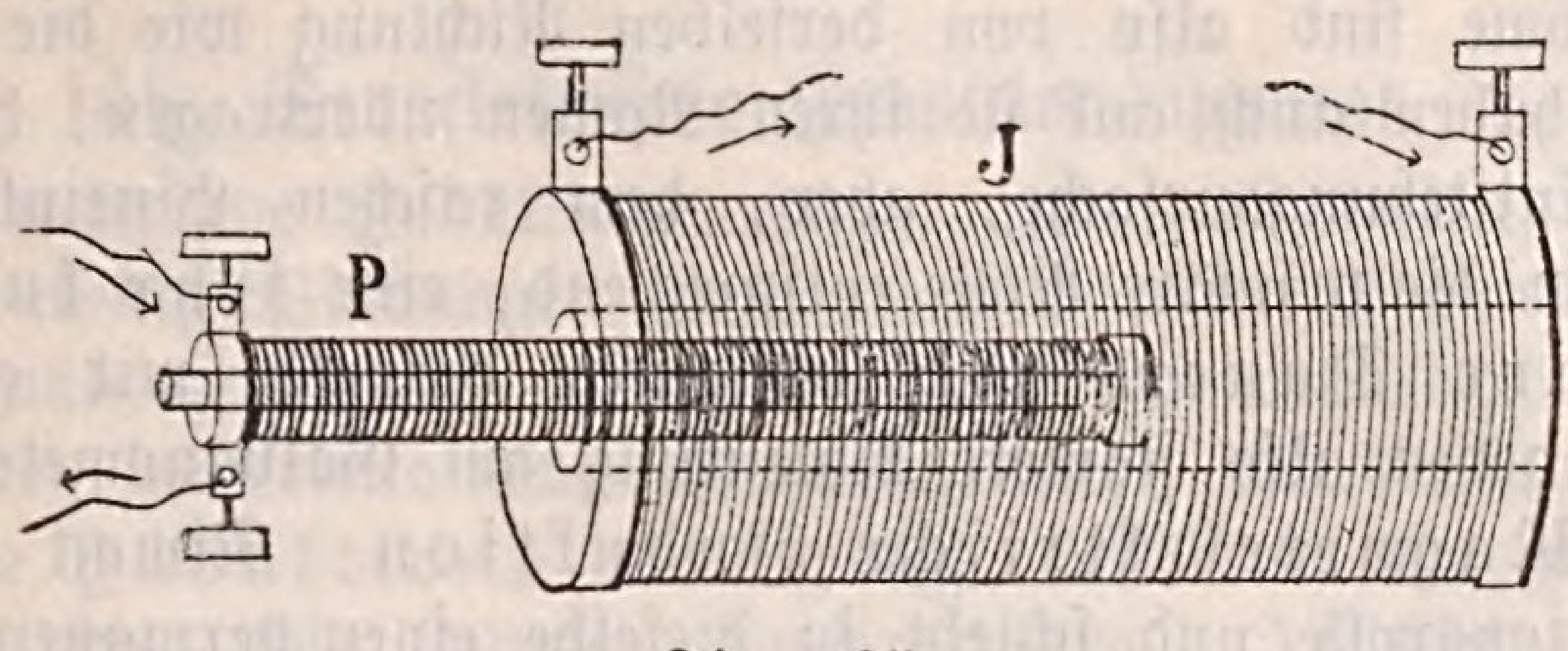


Fig. 185.

Man benützt: 1) die induzierende Rolle (P), das ist ein in vielen Windungen auf eine Spule gewickelter, isolierter Kupferdraht, durch welchen der Strom einer Batterie geleitet werden kann.

2) Die induzierte oder Induktionsrolle (J); das ist ein über eine größere Spule in sehr vielen Windungen gewickelter, meist viel feinerer, isolierter Kupferdraht: die Induktionsrolle kann so über die induzierende geschoben werden, daß letztere von ersterer ganz umhüllt wird. Die beiden Enden der Induktionsrolle führen zu Klemmschrauben, von denen Drähte zu einem empfindlichen Galvanometer führen, so daß die Induktionsrolle mit den Galvanometerwindungen einen geschlossenen Leiter bildet.

Damit stellt man folgende Versuche an:

a) Elektrische Induktion: Man leitet den Strom der Batterie durch die induzierende Rolle und schiebt dann die Induktionsrolle über die induzierende, so entsteht durch die Annäherung des geschlossenen Leiters an den Stromteil in der Induktionsrolle ein Strom, welcher die Nadel des Galvanometers ablenkt. Dieser Strom ist dem induzierenden oder primären Strome entgegengesetzt gerichtet und heißt **Schließungsstrom.**

Man zieht die Induktionsrolle von der induzierenden weg, so entsteht in der Induktionsrolle ein Strom, der die Nadel des Galvanometers nach der entgegengesetzten Richtung ablenkt; dieser Strom ist dem induzierenden Strome gleichgerichtet und heißt **Öffnungsstrom. Die beiden Induktionsströme sind der Richtung nach verschieden.**

Die Ströme dauern nur so lange, als die Bewegung des Annäherns und Entfernens dauert, **sobald die Bewegung aufhört, hört der Induktionsstrom auf,** weshalb die Nadel des Galvanometers auf 0 zurückgeht.

Wenn man die Induktionsrolle über die induzierende gesteckt hat, und nun erst den Strom in der primären Rolle schließt, so entsteht in der Induktionsrolle ein Induktionsstrom von derselben Richtung, wie wenn man die Induktionsrolle der primären nähert,

also ein Schließungsstrom; wenn man den Strom in der primären Rolle öffnet, so entsteht ebenso ein Öffnungsstrom. Diese Ströme sind also von derselben Richtung wie die zuerst gefundenen, haben auch auf sie ihren Namen übertragen, haben ganz ähnliche Entstehungsursache, aber, dem raschen Hineinlaufen des Stromes in die primäre Rolle entsprechend, eine sehr kurze, fast momentane Dauer, und verlaufen deshalb mit größerer Stärke, geben also stärkere Ablenkung am Galvanometer.

b) Magnetelektrische Induktion. Nimmt man bloß die Induktionsrolle und schiebt in dieselbe einen permanenten Stahlmagnet, so entsteht ein Strom; beim Herausziehen des Magnetstabes entsteht ein entgegengesetzt gerichteter Strom. Der Magnet wirkt ja nach Ampères Theorie wie ein Solenoid, und da der vorher benützte primäre Strom die Form eines Solenoides hatte, so kann er durch einen Magnet ersetzt werden. Deshalb können durch Annähern und Entfernen des Magnetes allein schon Ströme induziert werden.

Auch die Richtung dieser Ströme kann leicht gefunden werden, da beim Magnete am Nordpole, d. h. wenn man den Nordpol dem Auge zukehrt, die Ströme entgegengesetzt dem Zeiger der Uhr laufen. Steckt man den Magnet mit dem Nordpol voran in die Induktionsrolle, so ist der Induktionsstrom diesen Ampère-Strömen entgegengesetzt, und läuft wie die Uhr; zieht man den Magnet wieder heraus, so läuft der Strom gegen die Uhr. Bei Benützung des Südpoles entstehen Ströme von je entgegengesetzter Richtung.

c) Elektromagnetische Induktion. Wenn man in das Innere der induzierenden Rolle ein Stück weiches Eisen, oder besser ein Bündel weicher Eisenstäbe steckt, und nun dieselben Versuche wie in a wiederholt, so erhält man Ströme von gleicher Richtung wie vorher, jedoch von größerer Stärke. Denn der in der primären Rolle steckende Eisenkern wird bei Stromschluß magnetisch, beim Öffnen wieder unmagnetisch; die Kreisströme dieses Elektromagnetes sind aber gleich gerichtet den Kreisströmen der primären Rolle; beide wirken induzierend in demselben Sinne, weshalb die Induktionsströme der Summe beider Wirkungen entsprechen.

Alle diese wichtigen Gesetze wurden von Faraday 1831 entdeckt. Besonderes Interesse erregen die Magnetinduktionsströme deshalb, weil man, ähnlich wie man mittels des Stromes Magnetismus hervorrufen kann (Elektromagnet), so nun mittels des Magnetes auch wieder den elektrischen Strom hervorrufen kann, weil man ferner, ohne eine Batterie nötig zu haben, mittels des Magnetstabes allein Ströme erzeugen kann, und schließlich weil gerade diese magnetelektrischen Induktionsströme in jüngster Zeit eine ungeahnte Entwickelung erfahren und vielfache und großartige Anwendung gefunden haben. Man erhält diese magnetelektrischen Ströme als Äquivalent für die Kraft, die man aufwenden muß zur

Überwindung der Kraft, mit welcher die induzierten Ströme die Magnetpole anziehen resp. abstoßen.

148. Der elektrische Induktionsapparat.

Der elektrische Induktionsapparat hat eine induzierende Rolle von wenig Windungen eines ziemlich dicken Drahtes, so daß der Widerstand gering ist. In ihr steckt ein Bündel weicher Eisenstäbe, beiderseits etwas hervorschauend. Um die induzierende Rolle ist die Induktionsrolle gelegt, bestehend aus sehr vielen Windungen eines sehr dünnen Kupferdrahtes. Isolierung desselben mit Seide allein würde nicht genügen, deshalb wird der Draht mehrmals mit Schellack überstrichen. Man richtet es nun so ein, daß der primäre Strom sich selbst unterbricht, und benützt dazu eine Vorrichtung, ähnlich wie bei der elektrischen Klingel, die hier der Neefsche oder Wagnersche Hammer heißt. Man leitet nämlich den primären Strom in eine Klemme (K), in diese ist ein federndes Messingblech eingeklemmt, das an seinem freien Ende einen eisernen Knopf, den Hammer (H) trägt, der so angebracht ist, daß er nahe vor dem etwas herausragenden Ende des Bündels weicher Eisenstäbe sich befindet. In der Mitte wird das federnde Blech von einer Stellschraube (J) berührt, von welcher der Strom in die primäre Rolle und dann in die Batterie zurück geht. Ist nun der Strom geschlossen, also der Eisenkern der primären Rolle magnetisch, so wird der Hammer angezogen; dadurch entfernt sich das federnde Blech von der Stellschraube und unterbricht den Strom; dadurch wird aber der Eisenkern wieder unmagnetisch, der Hammer wird nicht mehr angezogen und das federnde Blech kehrt zurück, berührt dadurch die Stellschraube und der Strom ist wieder geschlossen; nun geschieht dasselbe wieder und es erfolgt rasch nacheinander Stromschluß und Stromöffnung, und infolge dessen jedesmal in der Induktionsrolle ein Strom. Zum Anziehen des Hammers verwendet man auch (Fig. 187) einen eigenen kleinen Elektro-

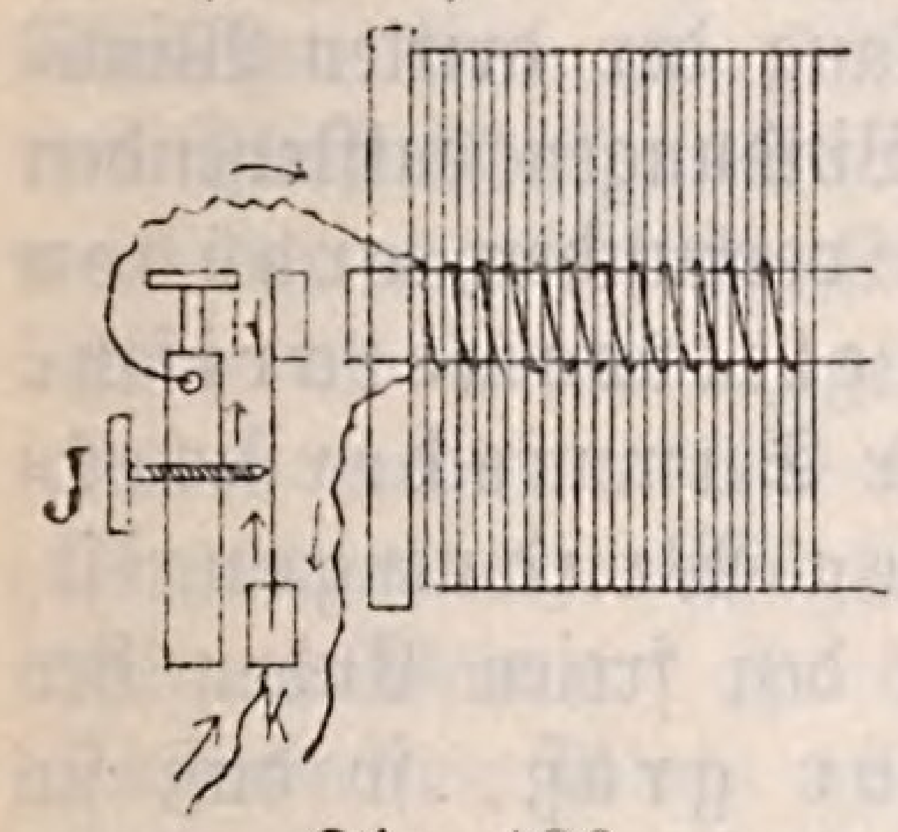


Fig. 186.

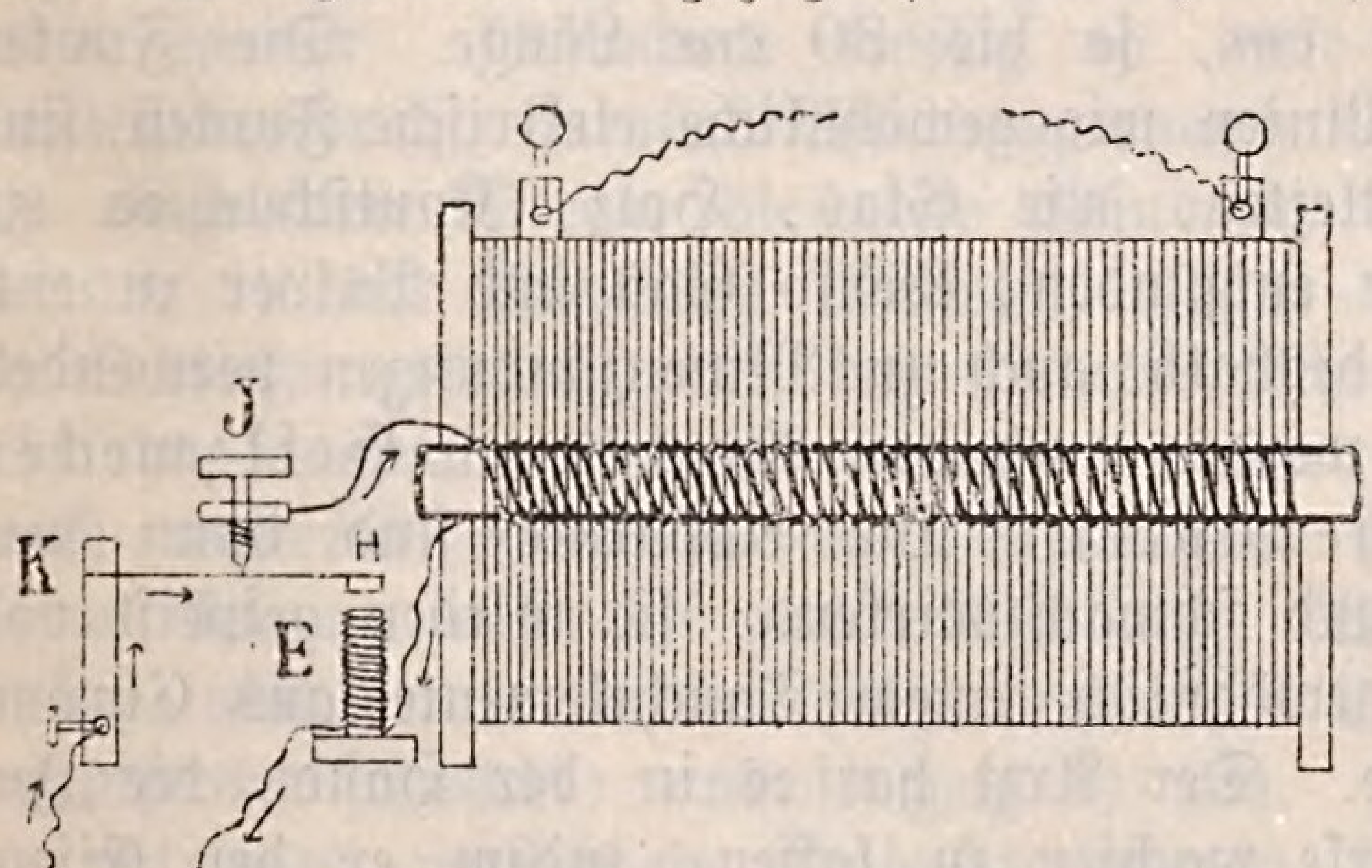


Fig. 187.

magnet (E), der auch vom Batteriestrom durchflossen wird. Diese Induktionsströme sind von sehr kurzer, fast momentaner Dauer, der Richtung nach wechselnd und entstehen in rascher Aufeinanderfolge. Sie können leicht in solcher Stärke erzeugt werden, daß, wenn man die Enden der Induktionsrolle bis auf geringen Abstand nähert, glänzende Funken zwischen ihnen überspringen. Dies hat man sich folgendermaßen zu erklären: In jeder einzelnen Windung der Induktionsrolle wird etwa beim Stromschluß ein Strom induziert, diese Ströme laufen alle nach derselben Richtung. Die elektromotorische Kraft eines einzelnen in einer Windung induzierten Stromes ist sehr klein; da aber das Ende einer Windung mit dem Anfang der folgenden Windung verbunden ist (zusammenhängt), und das Ende der zweiten Windung mit dem Anfang der dritten Windung u. s. f., so sind die in den einzelnen Windungen entstehenden Ströme auf elektromotorische Kraft miteinander verbunden, erhöhen also ihre elektromotorische Kraft, so daß die elektromotorische Kraft der Induktionsrolle gleich der Summe der elektromotorischen Kräfte aller einzelnen Windungen ist. Demnach ist auch die Spannung der an den freien Enden der Induktionsrolle auftretenden Elektrizitäten sehr groß, so daß sie sich sogar durch die Luft ausgleichen. Diese frei auftretende Elektrizität ist leicht nachzuweisen, indem man sie von einem Drahtende in ein Elektroskop springen läßt; die Goldplättchen divergieren kräftig. Meist ist jedoch die Elektrizitätsmenge so groß, daß sie dem Elektroskop schädlich wird. Man kann mit dieser Induktionselektrizität auch Leydener Flaschen laden.

Sehr mächtige solche Apparate wurden von Rhumkorff gemacht; die Induktionsrollen haben bis 30,000 Windungen und geben Funken von 20 *cm*, ja bis 30 *cm* Länge. Die Funken verlaufen in gezackten Linien wie gewöhnliche elektrische Funken, sind imstande, starre Nichtleiter, wie Glas, Holz, Kautschuck &c. zu durchlöchern, Papier zu entzünden, ebenso Gas und Pulver zu entzünden, und werden deshalb auch zu Minenzündungen verwendet.

Solche Apparate werden auch von Ärzten zu Heilzwecken gebraucht (Elektrotherapie). Die Apparate sind dann verhältnismäßig einfach und schwach wirkend; sie werden gespeist von nur einem Element, gewöhnlich einem Tauchelemente aus Chromsäure, Zink und Kohle. Der Arzt hat es in der Hand, die Induktionsströme an Stärke wachsen zu lassen, indem er den Eisenkern anfangs ganz herauszieht und dann allmählich immer weiter in die primäre Rolle hineinschiebt; beim Herausziehen werden die Ströme wieder schwächer. Leitet man solche Induktionsströme durch den menschlichen Körper oder durch Teile desselben, so empfindet man, so lange sie schwach sind, ein angenehmes Prickeln, wenn sie stärker werden, ein Zucken in den Muskeln, das bald schmerzhaft

und krampfhaft wird, so daß man z. B. nicht mehr imstande ist, die Hände zu öffnen, um die Drahtenden loszulassen; noch stärkere Ströme führen dann Lähmungen, sogar den Tod herbei. Der Arzt benützt die Ströme, die er der Stärke nach weise auswählt, um die Nerven zu reizen, wenn dieselben schwach, abgespannt und träge geworden sind. Diese Art des Elektrisierens nennt man auch Faradisieren (v. Faraday). Die Ärzte benützen auch den Strom einer Batterie, also einen konstanten Strom zu Heilzwecken, insbesondere um übermäßig erregte Nerven zu beruhigen. Man benützt dazu gewöhnlich Chromsäuretauchelemente, und zwar eine Batterie von sehr vielen, bis 60 Elementen, auf elektromotorische Kraft verbunden; die Elemente selbst sind dabei oft recht klein, Gläschen von ca. 50 *ccm* Inhalt, mit Zink und Kohlenstäbchen von Bleistiftdicke. Es ist notwendig, recht viele Elemente zu nehmen, weil der menschliche Körper einen großen Widerstand besitzt. Auch hiebei ist es so eingerichtet, daß der Arzt den Strom anfangs schwach nehmen und dann wachsen lassen kann; ein Kommutator (Stromwender) ermöglicht, den Strom in beliebiger Richtung fließen lassen zu können. In den Händen eines unkundigen Laien, der weder Art noch Stärke des Stromes richtig zu wählen versteht, ist die Anwendung der Elektrizität zu Heilzwecken meist von mehr Schaden als Nutzen.

149. Induktion des Stromes auf seine eigene Leitung.

Wenn man den Strom in einem Leiter schließt, so wirkt jeder vom Strome schon durchflossene Teil des Leiters auf jeden folgenden Teil induzierend, bringt also darin einen Schließungsstrom hervor. Besonders kräftig ist diese Wirkung, wenn im Schließungsdrahte parallele Windungen vorhanden sind; wenn nämlich der eingeleitete Strom die erste Windung durchläuft, so entsteht dadurch in der folgenden Windung (sogar in allen benachbarten) ein Schließungsstrom, der dem ursprünglichen entgegengesetzt läuft, also ihn schwächt. Von der Batterie her wird aber diese Schwächung durch weiteres Zufließen von Elektrizität überwunden, und der Strom kommt so in die zweite Windung. Während er diese durchläuft, induziert er in der folgenden einen Strom, der ebenso den Hauptstrom schwächt, und so geht es fort. Dieser beim Schließen des Stromes entstehende Induktionsstrom kommt also nicht als wirklicher Strom zum Vorschein, sondern besteht in einer Schwächung des Batteriestromes. Der Batteriestrom fließt infolge dieses Induktionsstromes nicht sofort in seiner ganzen (den Ohmschen Gesetzen entsprechenden) Stärke, sondern wächst allmählich auf diese Höhe an. Dieser beim Stromschluß in der eigenen Leitung induzierte Strom heißt Gegenstrom.

Ähnliches findet statt, wenn der Strom geöffnet wird; dadurch daß der Strom in der ersten Windung aufhört, induziert er in den folgenden einen Strom von gleicher Richtung, der also den noch vorhandenen Strom stärkt und dadurch auch dessen Aufhören verzögert. Dasselbe findet in jeder folgenden Windung statt. Diese beim Öffnen entstehende Induktion auf die eigene Leitung bewirkt also, daß, nachdem der Hauptstrom schon unterbrochen ist, in der Leitung noch ein Strom läuft, der Öffnungsextrastrom, auch bloß Extrastrom oder Extrakurrent genannt, der dem Hauptstrom gleichgerichtet ist, und sogar mit noch größerer Stärke verläuft.

Dieser Öffnungsextrastrom zeichnet sich durch besondere Wirkungen aus: Wenn man den Strom unterbricht dadurch, daß man zwei Drahtenden, durch welche er läuft, trennt, so sieht man einen Funken überspringen. Im Momente der Trennung, wenn der Abstand der Drahtenden noch ungemein klein ist, kommt der Öffnungsextrastrom mit hoher elektromotorischer Kraft; es treten also an die Drahtenden Elektrizitäten von so hoher Spannung, daß sie die (noch ungemein kleine) trennende Luftschichte in Funkenform überspringen. Sie reißen dabei Teilchen der Leiter weg, die dann in der Luft verbrennen. Hält man z. B. das eine Drahtende an eine Feile und fährt mit dem anderen über die Feile, so entstehen viele Öffnungsströme und die losgerissenen Eisenteilchen verbrennen unter lebhaftem Funkensprühen.

So oft bei der elektrischen Uhr die Pendelspitze das Quecksilber verläßt, entsteht durch den Öffnungsstrom ein Funke, der etwas Quecksilber verbrennt. Bei der elektrischen Klingel, beim Telegraphen entsteht bei jedem Öffnen des Stromes der Extrastrom, bringt einen Funken hervor, der Teilchen des Metalles losreißt. Bestehen hiebei die Berührungsstücke aus Kupfer oder Messing, so setzt sich wohl auch das verbrannte Kupfer an den Berührungsstellen an und verhindert dann die weitere Berührung. Es werden deshalb solche Kontakte bei elektrischen Klingeln, Uhren &c. bald unsicher; man macht sie deshalb meist aus Platin, das, wenn auch Teilchen davon verdampfen, doch stets blank bleibt.

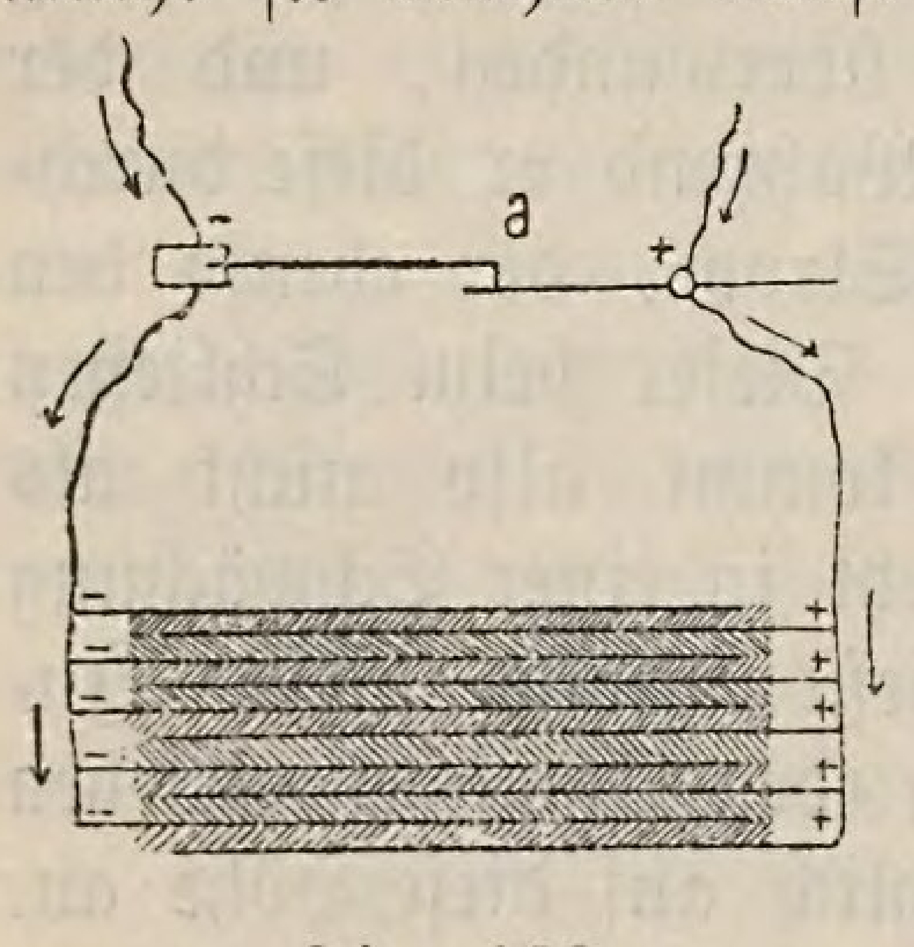


Fig. 188.

Man beseitigt diese Funkenbildung teilweise durch Einschaltung eines Kondensators. Der Kondensator besteht aus mehreren über einander geschichteten Stanniolblättern, die durch Wachstuchblätter von einander isoliert sind. Alle (in der Ordnungszahl) ungeraden Stanniolblätter werden unter sich und mit dem einen Teile des Kontaktes verbunden; die geraden Stanniolblätter werden unter sich und mit dem andern Teile des Kontaktes ver-

bunden. Wenn nun in a der Strom geöffnet wird und der Öffnungsstrom entsteht, so daß etwa von rechts +, von links — E zur Kontaktstelle hinläuft, so läuft sie auch in die Stanniolblätter; da dieselben große Flächen besitzen und sich nahe gegenüberstehen, so wirken sie kondensierend auf die hineinfließende Elektrizität. Es bekommt deshalb die freie Elektrizität an der Trennungsstelle keine besondere Spannkraft, es bildet sich also auch meist kein Funke. Nachdem der Kondensator anfangs dafür gesorgt hat, daß der Funke sich nicht bildet, kann der Funke auch später nicht mehr entstehen, weil bald die Entfernung der Kontaktstücke zu groß geworden ist. Die in den Stanniolblättern aufgespeicherte Elektrizität gleicht sich dann rückwärts fließend (durch die Batterie) aus.

Diese Extraströme sind besonders stark, wenn die Leitung viele Windungen macht wie bei den Elektromagneten, und wenn in derselben auch noch weiche Eisenkerne sich befinden, deren Magnetisierung und Entmagnetisierung ebenfalls induzierend wirkt. Hierauf beruht auch der Selbstinduktionsapparat. Er besteht aus einem Elektromagnete von vielen Windungen und einem Eisenkerne, der aus vielen von einander isolierten Stäben weichen Eisens besteht. Über ihm befindet sich ein Wagner'scher Hammer. Durch den Hammer wird der Strom in rascher Folge unterbrochen. Jeder Öffnungsstrom bewirkt nun einen Funken am Kontakte; leitet man aber von den zwei Kontaktstücken wie in Fig. 189 Drähte fort, zwischen welche ein Leiter von großem Widerstande, also etwa der menschliche Körper, ein Wasserzersetzer oder ähnliches, eingeschaltet ist, so verläuft auch der Öffnungsstrom durch diesen Leiter, geht also nicht durch die Luftschichte am geöffneten Kontakt und bildet keinen Funken. Schon in dieser einfachen Form, gespeist von nur einem Elemente, wird dieser Induktionsapparat vielfach von Ärzten benützt. Durch diesen Apparat gelingt auch die Wasserzersetzung, wenn sie auch mit dem Elemente allein wegen dessen geringer elektromotorischen Kraft nicht eintreten könnte; denn der durch den Wasserzersetzer fließende Extrakurrent hat eine hohe elektromotorische Kraft.

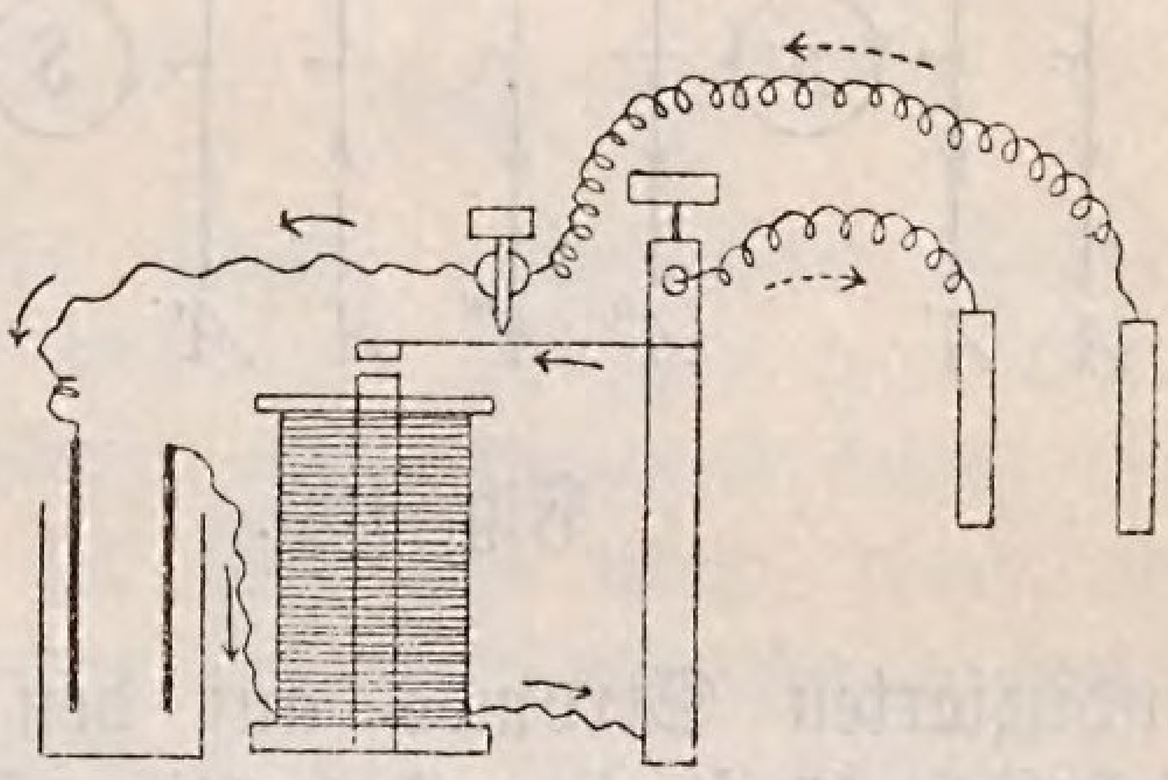


Fig. 189.

150. Induktion im magnetischen Feld.

Nach dem Vorigen können Induktionsströme schon dadurch allein hervorgebracht werden, daß man einen Teil eines geschlossenen Leiters in der Nähe eines Magnetpoles bewegt. Die Gesetze dieser magnetelektrischen Induktion werden recht einfach und anschaulich durch Betrachtung der magnetischen Kraftlinien und

durch Anwendung des dynamischen Prinzips. Das dynamische Prinzip, eine Erweiterung des Gesetzes von Lenz lautet: Die Richtung eines durch eine Bewegung induzierten Stromes ist stets so, daß durch Rückwirkung des induzierten Stromes auf den induzierenden Pol die Geschwindigkeit der Bewegung verlangsamt würde; **den Induktionsstrom erhält man als Ersatz oder Aequivalent für den Aufwand derjenigen Kraft (Dynamis), durch welche man das Verlangsamen verhindert.**

Wird ein Draht vor dem Pol eines Magnetes bewegt, so entsteht in ihm ein Induktionsstrom nur dann, wenn er dabei magnetische Kraftlinien durchschneidet. Die Induktion ist demnach am stärksten, wenn der Draht im magnetischen Feld selbst liegt und bei der Bewegung die Kraftlinien senkrecht durchschneidet.

Es sei in Fig. 190 AB ein Drahtstück, das im magnetischen Feld vor einem Nordpol N vorbeigeführt wird, so daß es dessen Kraftlinien durchschneidet, so wird in ihm, so lange es sich dem Pole nähert, ein Strom induziert, der den Pol (nach Örstedts Regel) abstößt; wenn sich dann der Draht vom Pol entfernt (von A″ B″ nach A‴ B‴), so wird in ihm ein Strom induziert, der den Pol anzieht. Bewegt sich also der Draht A B nach A′ B′, so würde ein in ihm in der Richtung A B laufender Strom nach Örstedts Regel den Nordpol nach links lenken, also anziehen; er soll aber abgestoßen werden, da die Bewegung des Annäherns durch Rückwirkung des

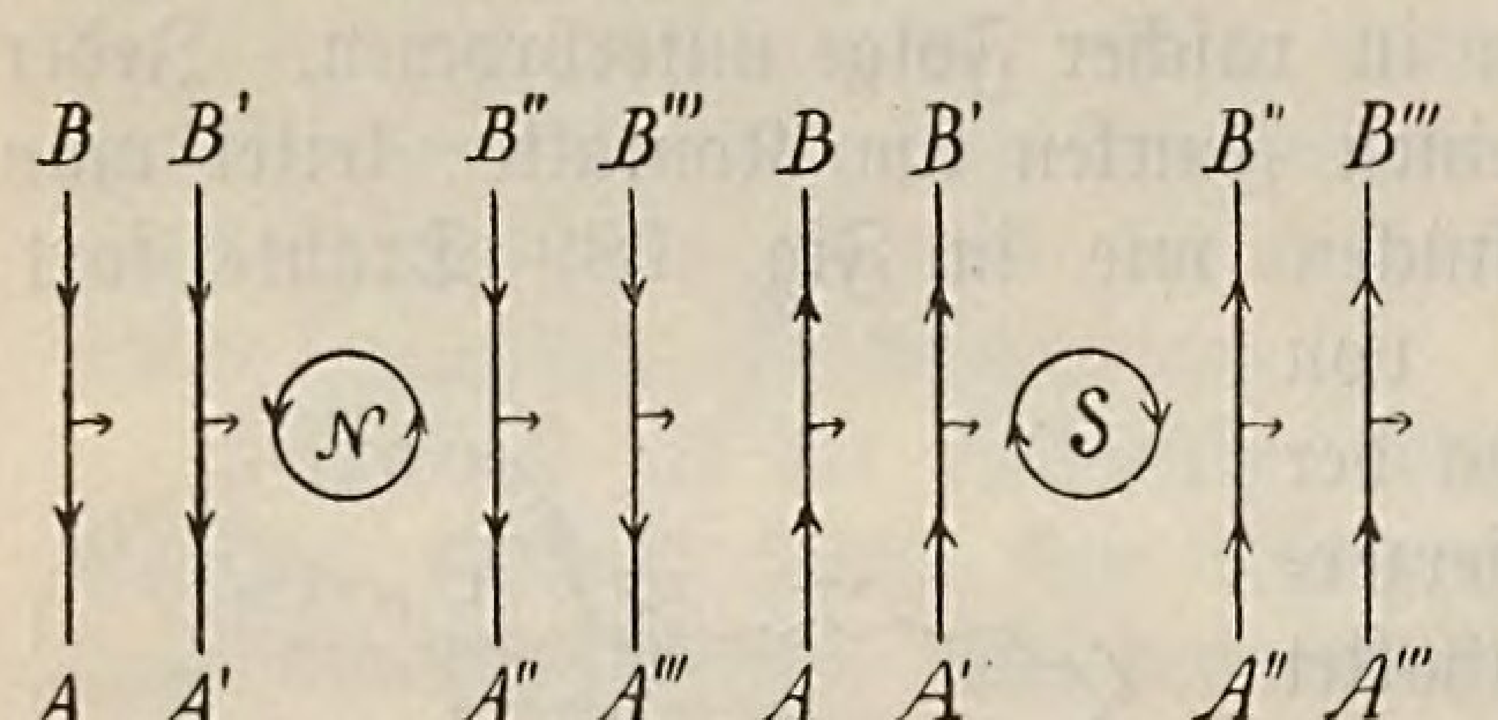


Fig. 190.

induzierten Stromes auf den Magneten verlangsamt werden soll, folglich läuft der Induktionsstrom in der Richtung BA. Bewegt sich dann der Draht von A″ B″ nach A‴ B‴, so daß er sich entfernt, so würde ein in der Richtung A″ B″ laufender Strom nach Örstedts Regel den Nordpol nach links ablenken, also abstoßen; er soll ihn aber diesmal anziehen, folglich läuft der Induktionsstrom in der Richtung B″ A″; das ist dieselbe Richtung wie vorher. Während also ein Drahtstück vor dem Nordpol vorbeigeführt wird und die aus dem Nordpol ausstrahlenden Kraftlinien durchschneidet, hat der Induktionsstrom eine während dieser Bewegung unveränderliche Richtung. Führt man den Draht vor einem Südpol vorbei, so hat der Induktionsstrom die entgegengesetzte Richtung.

Man nimmt nach Ampère an, daß im Magnete jedes Molekül Eisen von einem Kreisstrom umflossen sei, welcher am Nordpol läuft entgegengesetzt dem Zeiger der Uhr. Stellt man sich vor, daß auch

jede Kraftlinie an jedem Punkte von solchen Ampèreströmen umflossen sei, so ergibt sich die einfache Regel:

Wenn ein Drahtstück eine Kraftlinie durchschneidet, so hat der Induktionsstrom dieselbe Richtung wie der Ampèrestrom an der zuerst getroffenen Seite.

Wenn ein Drahtgewinde von der Form eines Solenoides an einem Pol vorbei oder zwischen zwei entgegengesetzten Polen durchbewegt wird, so ergibt sich die Richtung der Induktionsströme nach dem dynamischen Prinzip: Beim Annähern müssen Induktionsströme entstehen wie an gleichartigen Polen. Nach der vorher aufgestellten Regel: die bei der Bewegung vorangehenden Teile der Drahtwindungen durchschneiden die Kraftlinien und erhalten Induktionsströme von derselben Richtung wie der Ampèrestrom an der zuerst getroffenen Stelle. Diese Richtung behält der Induktionsstrom, bis das Solenoid vor dem Pol oder zwischen den Polen angekommen ist. Wird das Solenoid wieder von den Polen entfernt, indem man es etwa in derselben Richtung weiterbewegt, so entstehen nun Induktionsströme von entgegengesetzter Richtung wie vorher, denn sie müssen nun laufen wie auf ungleichnamigen Polen. Oder nach der vorher aufgestellten Regel: man berücksichtige, daß, während das Solenoid zwischen den Polen steht, alle oder doch fast alle Kraftlinien des Magnetes durch sein Inneres laufen, was besonders dann der Fall sein wird, wenn im Innern des Solenoides ein Kern weiches Eisen (Feldmagnet) steckt; bei der Entfernung vom Pol durchschneiden also die vorangehenden Teile der Drähte des Solenoides keine oder fast keine Kraftlinien, während nun die hinteren Teile die Hauptzahl der Kraftlinien durchschneiden, und deshalb Induktionsströme erhalten, die dieselbe Richtung haben wie die getroffenen Stellen der Kraftlinien. Das gibt dieselbe Richtung der Induktionsströme, sie laufen wie auf entgegengesetzten Polen.

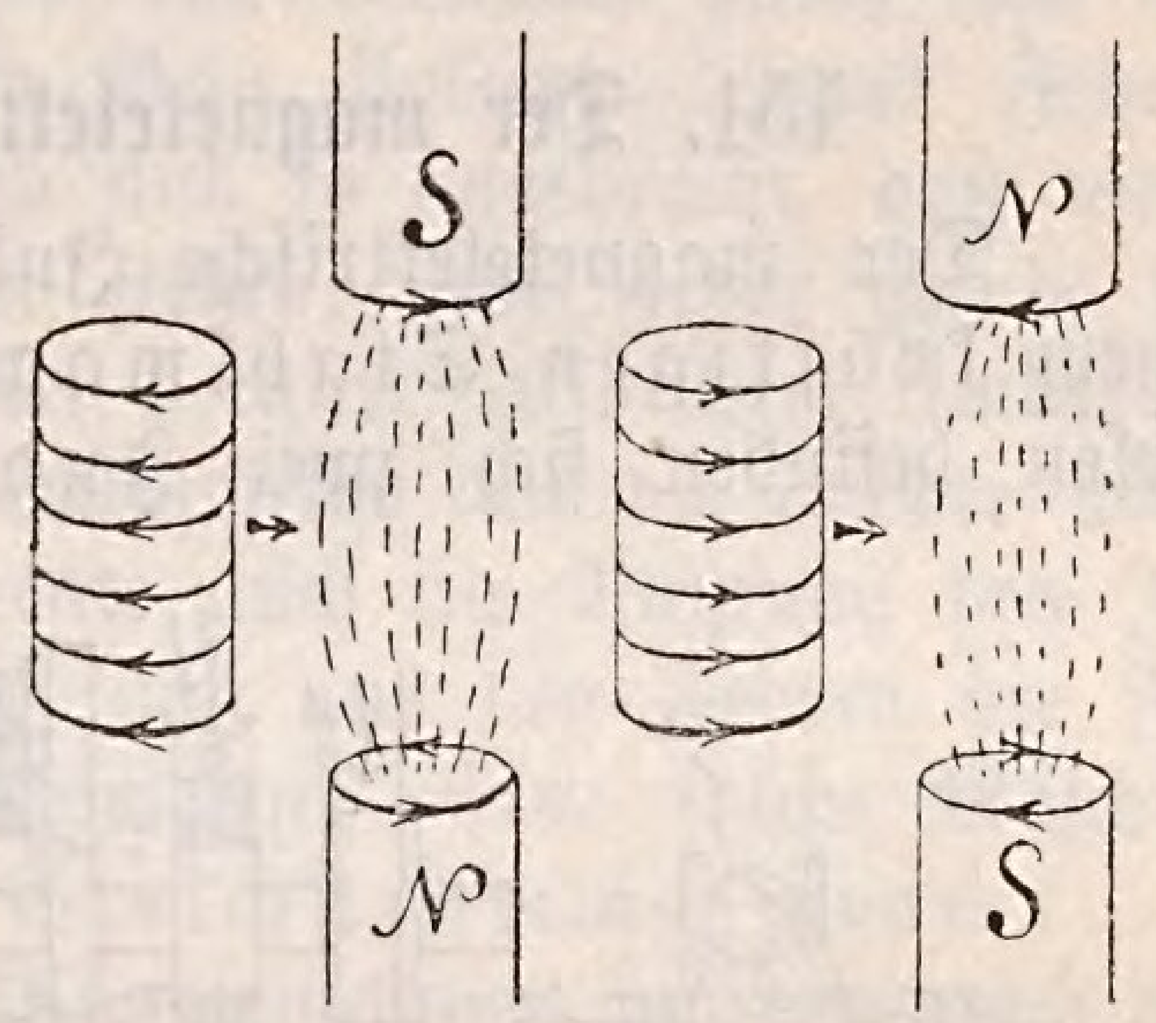


Fig. 191.

Wenn ein Drahtstück an einem Pol vorbeigeführt wird, so entsteht in ihm nur ein einziger Induktionsstrom; wenn ein Solenoid an einem Pol vorbeigeführt wird, so entstehen in ihm zwei Ströme von verschiedener Richtung, der eine beim Annähern, der andere beim Entfernen. Wenn man ein Solenoid vom Nordpol entfernt und zugleich einem Südpol nähert, wenn also das Solenoid einen Polwechsel ausführt, so entstehen, wie leicht zu sehen ist,

zwei Ströme von gleicher Richtung, welche sich zu einem einzigen Strom aneinander schließen. Führt das Solenoid dann den entgegengesetzten Polwechsel aus, indem es vom Südpol zum Nordpol geht, so entsteht ein Strom von entgegengesetzter Richtung.

Mittels eines Solenoides mit Eisenkern, das man am Pol eines kräftigen Magnetes vorbeiführt, und eines empfindlichen Galvanometers kann man diese magnetelektrischen Induktionsströme leicht nachweisen.

Die elektromotorische Kraft dieser Induktionsströme ist abhängig von der Stärke des magnetischen Feldes und von der Geschwindigkeit der Bewegung, so daß die elektromotorische Kraft um so größer ist, je mehr Kraftlinien in einer Zeiteinheit durchschnitten werden.

151. Der magnetelektrische Induktionsapparat.

Der magnetelektrische Induktionsapparat besteht zunächst aus einem kräftigen Stahlmagnete von Hufeisenform. Vor seinen Polen befinden sich zwei Induktionsspulen; diese stecken auf

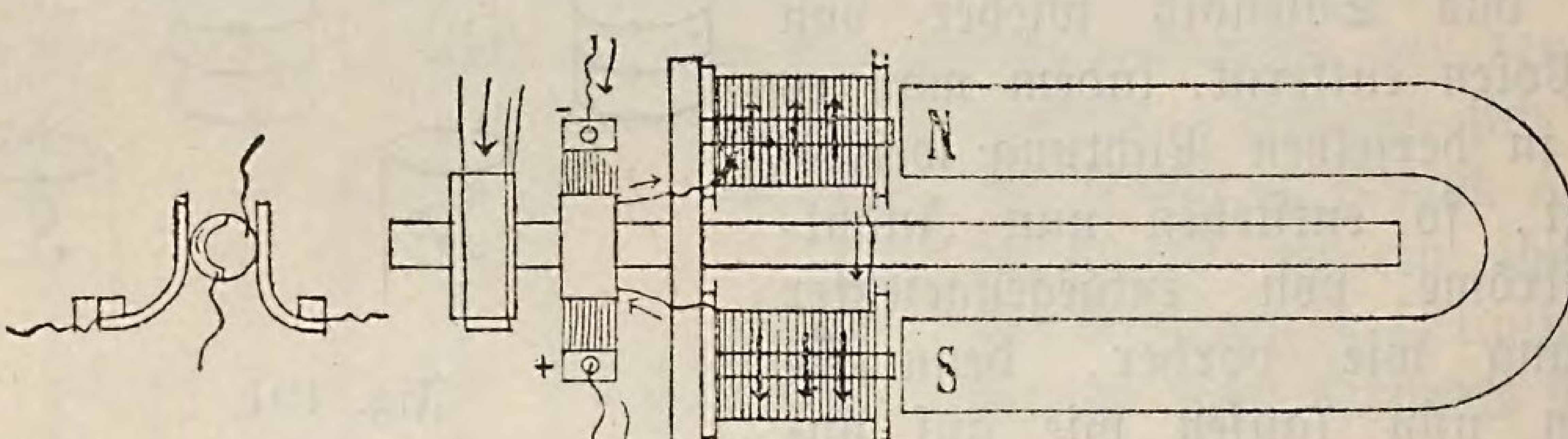


Fig. 192.

zwei parallelen Eisenkernen, die durch ein Querstück aus weichem Eisen verbunden sind, ähnlich wie bei einem Elektromagnete. Die Induktionsspulen sind auf einer drehbaren Achse so befestigt, daß, wenn man die Achse dreht, jede Spule vom einen Pole des Magnetes weg und zum andern Pole sich hinbewegt, also einen Polwechsel ausführt. Die Achse kann durch eine Kurbel in rasche Rotation versetzt werden, so daß die Induktionsspulen in rascher Folge die Polwechsel ausführen. Dadurch entstehen Induktionsströme, welche dadurch verstärkt werden, daß die Eisenkerne der Spulen die magnetischen Kraftlinien in sich hineinziehen.

Die Induktionsströme sind Wechselströme, welche stets dann, wenn die Rollen vor den Polen sind, ihre Richtung wechseln.

Man verbindet die zwei Rollen wie zwei galvanische Elemente, entweder auf Intensität (Spannung) oder auf Quantität, und hat somit zwei freie Drahtenden, aus welchen die Ströme nun noch herausgeleitet werden müssen. Man bringt auf der Achse zwei Messingscheiben an, die eine direkt, die andere durch Holz- (oder

Bein-) Unterlage isoliert, führt die Drahtenden zu diesen Scheiben und läßt an den Scheiben zwei kupferne Federn schleifen, die zu zwei Klemmschrauben führen. Dadurch werden die Ströme aus den Scheiben durch die Federn zu den Klemmen geführt und können von diesen aus beliebig weitergeleitet werden. Da die Ströme in der Leitung als wechselnde verlaufen, so nennt man eine solche Maschine eine *Wechselstrommaschine*.

Will man die Ströme als *gleichgerichtete* aus der Maschine herausleiten, so bringt man den *Kommutator* (Stromwender) an. Auf der Drehungsachse werden zwei halbkreisförmige Scheiben so befestigt, daß sie eine ganze Scheibe zu bilden scheinen, und die Poldrähte der Induktionsrolle werden zu den Halbscheiben geführt; beide Scheiben werden aber von einander durch eine dazwischen gelegte Schichte Holz oder Bein isoliert. Zwei Federn berühren die beiden Halbscheiben und sind so angebracht, daß, wenn die Induktionsrollen vor den Polen stehen, jede Feder gerade die Trennungslinie der beiden Halbscheiben berührt, also beim Umdrehen in diesem Momente von der einen Halbscheibe auf die andere übertritt. Da nun in demselben Momente auch die Richtung des Induktionsstromes wechselt, so ist klar, daß aus den Federn die Induktionsströme gleichgerichtet herauskommen. Eine solche Maschine nennt man eine *Einstrom-* oder *Gleichstrommaschine*.

Solche magnetelektrische Induktionsmaschinen wurden auch von den Ärzten benützt, werden aber durch die besseren elektrischen Induktionsapparate verdrängt. Vielfach werden sie heutzutage benützt, um *elektrische Klingeln* in Thätigkeit zu setzen *und bei denselben die Batterie zu ersetzen*.

Man kann solche Maschinen leicht größer und stärker wirkend konstruieren. Man bringt dann mehrere Magnete so an, daß ihre Pole in einem Kreise so liegen, daß immer Nord- und Südpol abwechseln. Vor dem Kreise bringt man eine Scheibe an, die auf einer Achse aufsitzt und durch dieselbe gedreht werden kann. Auf dem Umfange der Scheibe bringt man so viele Induktionsrollen an, als Magnetpole vorhanden sind, so daß beim Umdrehen jede Rolle, von Pol zu Pol wandernd, in rascher Folge Polwechsel macht und Induktionsströme produziert; die Drahtenden der Rollen verbindet man nach Bedarf auf Intensität oder Quantität und leitet sie zu Schleiffedern wie früher. Man verstärkt die Wirkung, wenn man nicht bloß einen Kranz von Magnetpolen anbringt, der den vorderen Enden der Induktionsrollen gegenüberliegt, sondern noch einen Kranz von ungleichnamigen Magnetpolen, der den hinteren Enden der Induktionsrollen gegenüberliegt, so daß jede der Induktionsrollen, deren Eisenkerne nun nicht mehr mit denen der benachbarten verbunden sind, zwischen zwei ungleichnamigen Magnetpolen liegt. Von der Verwendung solcher großen Maschinen wird später die Rede sein.

Eine wesentliche Vereinfachung und Verbesserung der magnetelektrischen Induktionsapparate wurde erzielt durch die von Siemens erfundene Induktionsspule (Cylindermagnet); sie besteht aus

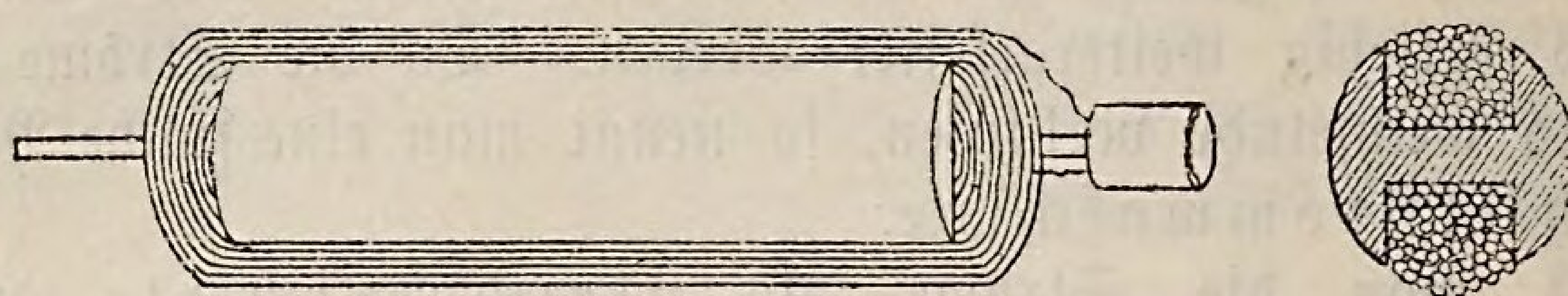


Fig. 193.

einem stabförmigen Stück weichen Eisens von nebenstehendem Querschnitte, sieht also aus wie eine cylindrische Walze, in welche der Länge nach zwei tiefe und breite Rinnen eingegraben wurden; längs dieser Rinnen wird nun der Länge nach isolierter Draht gewickelt, so daß er sie fast ausfüllt. Die Spule ist drehbar um eine Achse, die der Länge nach durch ihre Mitte geht. Auf der Achse sind (wie früher) zwei Ringe oder zwei Halbringe befestigt, zu denen die Drahtenden geführt werden; die Ringe werden von den Schleiffedern berührt, durch welche die gleichgerichteten Ströme herauslaufen.

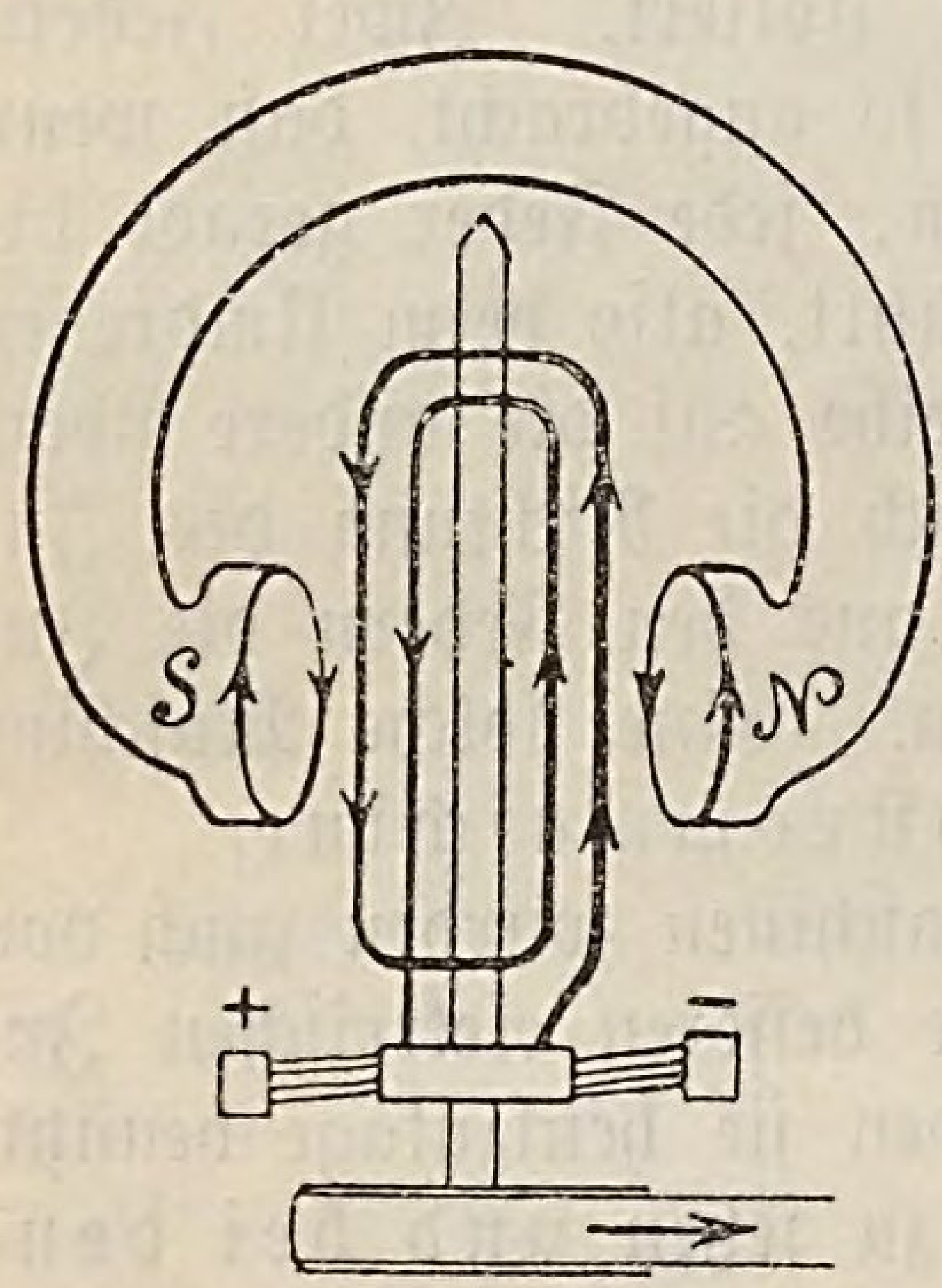


Fig. 194.

Der Eisenkern hat den Zweck, die Kraftlinien durch den Raum zu leiten, in welchem sich die Drähte bewegen. Diejenigen Teile der Drahtwindungen, welche eben am Nordpol vorbeigehen und dort die Kraftlinien durchschneiden, erhalten einen gewissen Strom, die andern Teile, welche dabei eben am Südpol vorbeigehen, erhalten entgegengesetzten Strom; beide Ströme durchlaufen die Windungen in derselben Richtung. Wenn die Windungen die Mittelebene zwischen Nord- und Südpol überschreiten, wechselt der Strom in den Drahtwindungen seine Richtung.

152. Die dynamoelektrische Maschine.

Die Stärke des durch die magnetelektrischen Maschinen erhaltenen Stromes hängt ab zunächst von der Anzahl der Windungen und der Geschwindigkeit der Umdrehung, und zwar ist die elektromotorische Kraft des Stromes jeder dieser Ursachen nahezu direkt proportional. Sie ist aber auch proportional der Stärke des verwendeten Magnetes. Man ersetzt also den Stahlmagnet der magnetelektrischen Maschine durch einen Elektromagnet.

Um aber den Elektromagnet magnetisch zu machen, dazu hat man einen Strom nötig; diesen etwa durch eine Batterie zu erzeugen, ist zu teuer. Dr. Werner Siemens verdankt man den glücklichen Gedanken, den durch die Umdrehung der Induktionsspule erhaltenen gleichgerichteten Strom dazu zu verwenden, um den Elektromagnet zu speisen. Man nimmt also eine Siemens'sche Spule, steckt sie zwischen die Pole eines großen Elektromagnetes, dessen Eisenkerne entsprechend der Länge der Spule, breite Eisenplatten sind, leitet von der einen Schleiffeder der Spule den Draht in die Win-

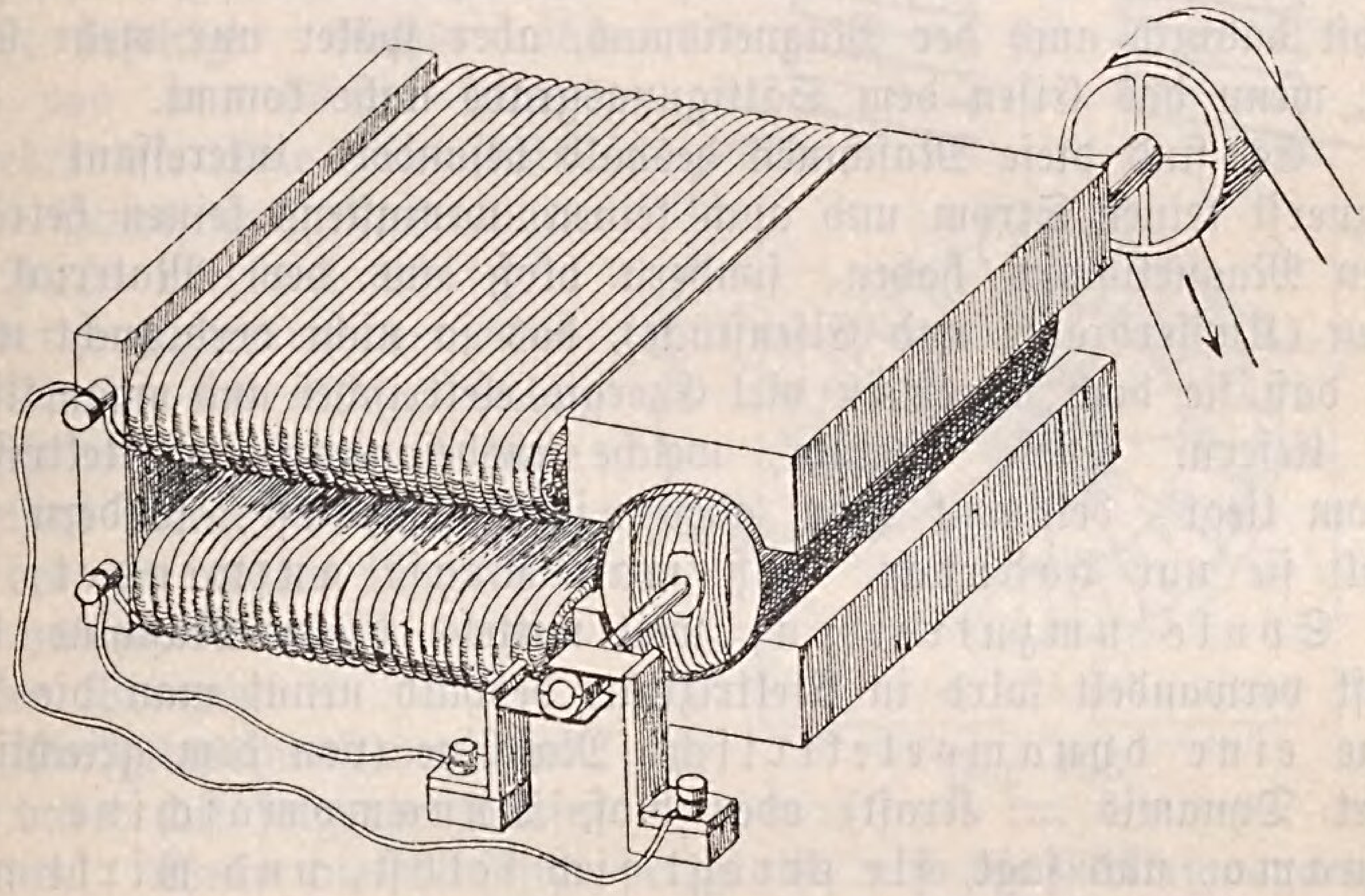


Fig. 195.

dungen des Elektromagnetes und verbindet deren Ende mit der anderen Schleiffeder. Fig. 195.

Läßt man, nachdem der Apparat so konstruiert ist, einen Batteriestrom durch den Elektromagnet gehen, so wird er magnetisch; entfernt man den Batteriestrom, so verlieren die Eisenkerne ihren Magnetismus nicht vollständig, sondern sie behalten einen kleinen Rest Magnetismus, remanenter Magnetismus. Dieser genügt, um fernerhin die Selbsterregung der Maschine zu veranlassen. Setzt man nämlich nun die Maschine in Gang, so induziert schon bei der ersten Umdrehung der remanente Magnetismus einen wenn auch schwachen Strom, dieser wird durch den Kommutator gleichgerichtet und durchläuft den Elektromagnet und zwar so, daß er den vorhandenen remanenten Magnetismus verstärkt. Bei der zweiten Umdrehung erregt der nun stärkere Elektromagnet einen stärkeren Strom, der auch wieder durch den Elektromagnet läuft und diesen verstärkt. So geht es nun fort, Strom und Elektromagnet verstärken sich gegenseitig und die Maschine erregt

sich durch fortgesetzte Multiplikation des anfangs vorhandenen schwachen Magnetismus. Hört man auf zu drehen, so verschwindet der Strom und damit der Magnetismus; aber es bleibt eine Spur Magnetismus zurück, genügend, um beim Wiederbeginn des Umdrehens die Selbsterregung der Maschine wieder einzuleiten. Die Maschine erregt sich hierbei sehr rasch, so daß wenige Umdrehungen genügen, um sie in volle Thätigkeit zu setzen. Die Stärke des Stromes und des Elektromagnetes wächst aber nicht beliebig hoch, sondern beide erreichen bald eine Grenze; zwar wird der Strom immer stärker, je rascher man umdreht, denn es wächst dadurch seine elektromotorische Kraft; es wächst dadurch auch der Magnetismus, aber später nur mehr langsam, wenn das Eisen dem Sättigungsgrade nahe kommt.

Es sind diese Maschinen deshalb besonders interessant, weil sie zuerst keinen Strom und auch keinen, wenigstens keinen beträchtlichen Magnetismus haben, sondern bloß aus dem Material bestehen (Kupferdrähte und Eisenstücke), das ja nicht verbraucht wird, und daß sie doch ungemein viel Energie elektrischer und magnetischer Art liefern. Diese Energie, welche insbesondere im elektrischen Strom liegt, bekommt man aber nicht umsonst, sondern man erhält sie nur dadurch, daß man Kraft aufwendet, um die Spule umzutreiben; weil mittels dieser Maschine diese Kraft verwandelt wird in Elektrizität, deshalb nennt man die Maschine eine dynamoelektrische Maschine (von dem griechischen Wort Dynamis = Kraft) oder bloß Dynamomaschine, oder Dynamo, und sagt, sie erregt sich selbst, und wirkt nach dem dynamischen Prinzip.

153. Der Gramme'sche Ringinduktor.

Die Dynamomaschinen haben noch eine wesentliche Abänderung und Verbesserung erfahren durch Gramme, der die Siemenssche Spule durch einen ringförmigen Induktionsapparat, den Gramme'schen Ring, ersetzte. Dieser besteht aus einem Ring von weichem Eisen, der die Gestalt eines hohlen Cylinders hat; er ist mit isoliertem Kupferdrahte bewickelt, und zwar geht der Draht an der äußeren Fläche des Ringes längs einer Cylinderkante, kehrt auf der zugehörigen inneren Kante zurück, geht dann wieder längs der äußeren Kante, dann längs der inneren Kante zurück u. s. f. bis der ganze Ring bewickelt ist. Die Drahtwindungen sind in Gruppen abgeteilt, etwa 16, 24, 32, oder 12 wie in der Figur, die neben einander liegen; die Windungen einer Gruppe bedecken also den 24. Teil des Cylinders, und sind meist gering an Zahl, oft nur 6 oder 4; in der Figur sind je 3 gezeichnet; das Ende jeder Gruppe ist mit dem Anfange der nächsten Gruppe verbunden. Von jeder Verbindungsstelle führt ein Drahtstück in der Richtung des Radius gegen die Achse des Ringes; auf der Achse

sind auf einem cylindrischen Holzstücke Messingstäbe eingelassen, die durch Holz von einander isoliert sind und längs der Kanten des Cylinders laufen. Jedes Drahtstück führt von der Verbindungsstelle zweier Gruppen zu einem Messingstreifen. Auf diesen Messingstreifen schleifen zwei Kupferdrahtbürsten, durch Federn angedrückt, und zwar eine oben, die andere unten. Der ganze Gramme'sche Ring ist auf einer drehbaren Achse befestigt. Rechts und links von dem Ringe stehen entweder die Pole eines kräftigen Hufeisenmagnetes oder die Pole eines kräftigen Elektromagnetes, der durch den Strom des Ringes selbst gespeist wird; also auch diese Maschine erregt sich selbst mittels des remanenten Magnetismus und wirkt nach dem dynamischen Prinzip.

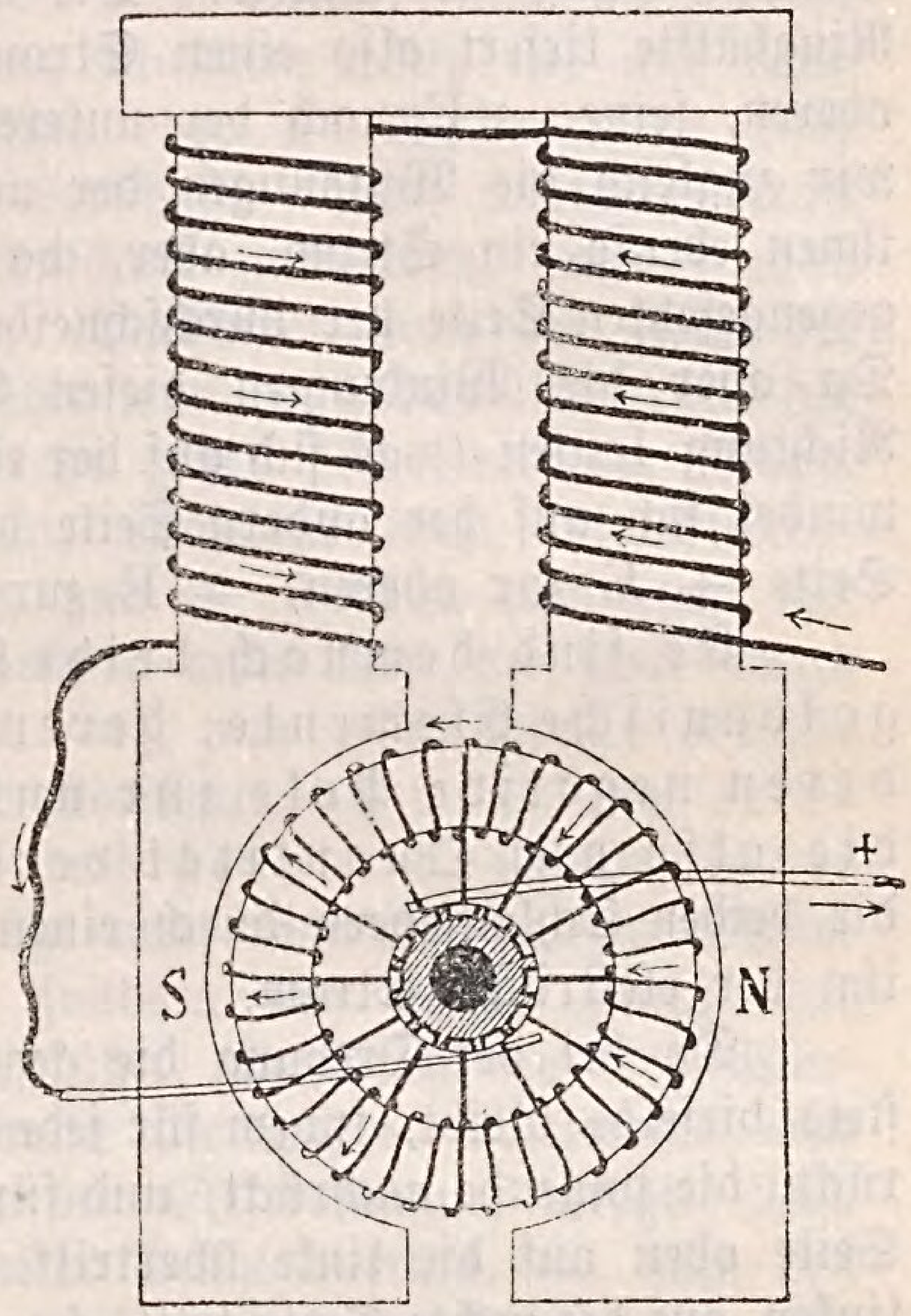
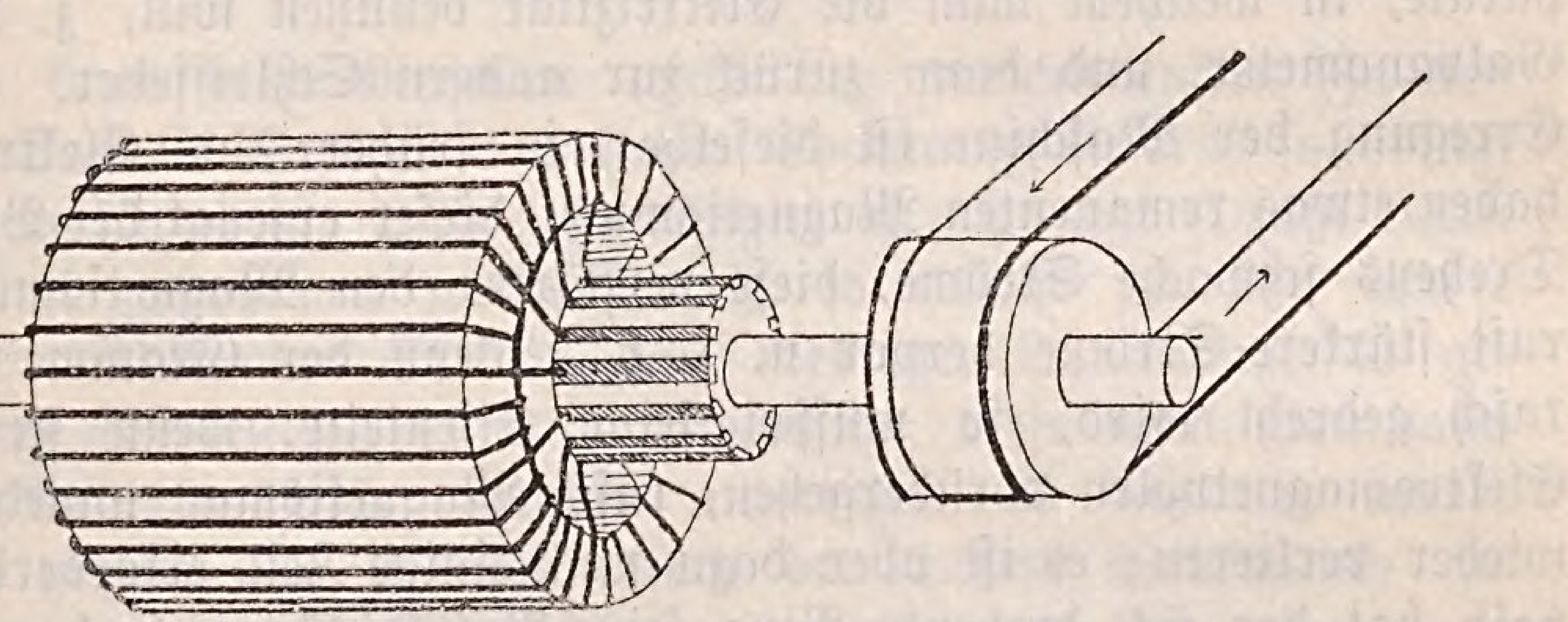


Fig. 196.

Die Induktionsströme kommen dabei auf folgende Weise zustande. Wenn die Maschine erregt ist, also die Elektromagnetpole magnetisch sind, so gehen die Kraftlinien vom Nordpol in den nächstliegenden Teil des Ringes, durchlaufen den Eisenkörper des Ringes,


Fig. 197.

ohne ihn unterwegs zu verlassen, und treten dann auf der gegenüberliegenden Seite des Ringes in den Südpol über. Betrachten wir diejenigen Gruppen, welche sich eben auf der dem einen Pol zugekehrten Seite des Ringes befinden, so stellen sie eine Drahtspule vor, die nur am oberen und unteren Ende mit den Schleiffedern in Verbindung steht. In jeder Windung derselben wird ein

Strom von gleicher Richtung induziert, und zwar immer nur auf der äußeren Seite des Ringes, da nur dort Kraftlinien durchschnitten werden; der auf der Innenseite des Ringes laufende Teil jeder Drahtwindung ist inaktiv. Die Gesamtheit der Windungen dieser Ringhälfte liefert also einen Strom, der seine + E etwa nach der oberen, seine — E nach der unteren Schleiffeder schickt. Betrachten wir zugleich die Windungen der anderen Ringhälfte, so entsteht in ihnen ebenso ein Strom, aber, da sie die Kraftlinien von der entgegengesetzten Seite her durchschneiden, von entgegengesetzter Richtung. Da aber die Windungen dieser Seite auch nach entgegengesetzter Richtung laufen (was sich auf der einen Seite nach aufwärts windet, windet sich auf der andern Seite nach abwärts), so liefert auch diese Seite + E zur oberen, — E zur untern Schleiffeder.

Es sind demnach beide Hälften anzusehen als zwei galvanische Elemente, deren positive Pole zur oberen, deren negative Pole zur unteren Schleiffeder führen, die also auf Quantität verbunden sind; werden demnach die beiden Schleiffedern durch einen Draht verbunden, so läuft durch ihn der elektrische Strom.

Da bei der Drehung die gegenseitige Stellung der Windungen stets dieselbe bleibt, indem für jede Windung, die aus ihrer Stellung rückt, die folgende nachrückt, und für jede Gruppe, die von der rechten Seite oben auf die linke übertritt, auch unten eine Gruppe von der linken auf die rechte Seite tritt, so ist der erzeugte Strom fast vollständig gleichmäßig, nie unterbrochen und verändert seine Stärke nicht, wenn man gleich rasch weiter dreht. Die Drahtführung ist dieselbe wie früher: von der einen Schleiffeder durch die Windungen des Elektromagnetes, dann zu dem Apparate, in welchem man die Elektrizität benützen will, z. B. einem Galvanometer, und dann zurück zur andern Schleiffeder. Auch die Erregung der Maschine ist dieselbe wie früher: die Elektromagnete haben etwas remanenten Magnetismus; dieser erzeugt bei Beginn des Drehens schwache Ströme, diese verstärken den Magnetismus, dieser ruft stärkere Ströme hervor u. s. f. Wenn der Gramme'sche Ring rasch gedreht wird, so müssen seine Eisenteile, wenn sie an den Elektromagnetpolen vorübergehen, rasch Magnetismus annehmen und wieder verlieren; es ist aber dazu noch einige Zeit erforderlich; deshalb hat der sich drehende Ring seine Pole nicht gerade den Magnetpolen pegenüber, sondern im Sinne der Drehung erst etwas später, also links etwas weiter unten, rechts etwas weiter oben. Damit verschieben sich auch die Stellen, in denen die Instruktionsströme ihre Richtung wechseln, etwas im Sinne der Drehung. Diese Stellen nennt man auch die neutralen Punkte. Es werden deshalb die Schleiffedern nicht genau oben und unten angebracht, sondern im Sinne der Drehung etwas verschoben, also oben etwas nach links,

unten etwas nach rechts, möglichst genau an die neutralen Punkte. Solche Dynamomaschinen werden heutzutage zu den verschiedensten Zwecken verwendet; denn sie liefern, groß ausgeführt, mächtige elektrische Ströme zu billigem Preise, da beim Betriebe nur die Kraft zu bezahlen, die zum Umtreiben der Maschine nötig ist, und man diese Kraft durch eine Dampfmaschine oder ein Wassergefälle oder sogar durch den Wind sich billig verschafft. Daß wirkliche Kraft verwendet werden muß, um die Maschine zu treiben, erkennt man leicht an dem folgenden Versuche. Verbindet man die Pole der Maschine nicht mit einander, so fühlt man, daß das Umdrehen der Maschine verhältnismäßig leicht geht; denn weil der Strom nicht geschlossen ist, erregt sich die Maschine nicht, die Elektromagnete bleiben schwach magnetisch, und es ist beim Umdrehen nur die Reibung zu überwinden. Sobald man aber die Pole durch einen Draht verbindet, fühlt man, daß nun viel mehr Kraft nötig ist; denn nun erregt sich die Maschine, es wird ein elektrischer Strom produziert, und gerade dazu wird die Kraft verwendet. Häufig benützt man nicht den ganzen Strom zur Erregung der Elektromagnete, sondern nur einen Zweig desselben. Von der einen Polklemme führt ein Draht zu den Windungen des Elektromagnetes und dann zur anderen Polklemme; das ist der eine, innere Zweig, welcher den Elektromagnet erregt. Von der einen Polklemme führt ein zweiter Draht dorthin, wo man den Strom benützen will, und von da zurück zur anderen Polklemme; das ist der äußere Zweig. Diese Verzweigung hat den Vorteil, daß auch dann, wenn der äußere Kreis nicht geschlossen ist, oder wenn im äußeren Kreise ein großer Widerstand vorhanden ist, doch der innere Kreis geschlossen bleibt und deshalb die Elektromagnete stets erregt sind.

Man kann diese Maschine leicht den verschiedensten Zwecken anpassen. Soll sie Ströme von hoher Spannung liefern, so bringt man im Induktionsring viele Windungen an; da der Draht dabei ziemlich dünn genommen werden muß, so erhöht sich der innere Widerstand. Will man Ströme von niedriger Spannung, so genügen wenige Windungen im Induktionsring; diese kann man dann aus dicken Drähten, dicken Stäben anfertigen, so daß der innere Widerstand gering ist; ist dabei auch der äußere Widerstand gering, so hat man große Stromstärke von niedriger Spannung.

Man mißt die Leistung einer Dynamomaschine nach Ampère-Volt. Liefert eine Maschine einen Strom von 1 Amp. Stärke, und ist dabei die Potenzialdifferenz an den Polklemmen 1 Volt, so sagt man, sie liefert 1 Ampère-Volt, 1 A. V, sie ist imstande, die ganze Elektrizitätsmenge, welche bei 1 A Stromstärke durch die eine Polklemme hereinfließt, bei der andern Polklemme mit einer um 1 V höheren Spannung hinauszuliefern. Gibt eine andere

Maschine einen Strom von 5 A auch bei 1 V, so ist, da sie eine 5mal größere Elektrizitätsmenge in ihrer Spannung erhöht, ihre Leistung 5mal größer, ihre Leistung ist 5 A V. Liefert eine 3. Maschine einen Strom von 5 A bei 6 V, so ist, da sie die Elektrizitätsmenge auf eine 6mal höhere Spannung bringt, oder 6mal nach einander die Spannung um 1 V erhöht, ihre Leistung 6mal größer als die der zweiten Maschine; ihre Leistung ist demnach = 5. 6 = 30 A. V. Dies gibt allgemein den Satz: Die Leistung einer elektrischen Maschine wird gemessen durch das Produkt aus Stromstärke (A) mal Potenzialdifferenz (V) des erzeugten Stromes:

Leistung = Amp. Volt.

Man fand, daß eine elektrische Maschine für jede Pferdekraft, welche sie zum Umdrehen verbraucht, einen Strom von 735 A V geben könnte; in Wirklichkeit liefert sie ca. 600 A V, die besten liefern bis 700 A V. Bedarf demnach eine Maschine 10 Pferdekräfte, so liefert sie einen Strom von 10. 600 = 6000 A V; je nach ihrer Einrichtung liefert sie einen Strom von niedriger Spannung (etwa 3 V), der aber dann eine große Stromstärke hat (2000 A) und man nennt einen solchen Strom einen Quantitätsstrom; oder sie liefert einen Strom von hoher Spannung (100 V, 500 V), der aber dann nur eine mäßige oder geringe Stromstärke besitzt (60 A bezw. 12 A), und man nennt einen solchen Strom einen Spannungsstrom.

Man hat an diesen Maschinen noch manche abgeänderte Konstruktionen versucht, von denen die Siemens'sche Trommelmaschine und die Schuckert'sche Flachringmaschine genannt sein mögen, weil bei ihnen die inaktiven Teile der Drahtwindungen möglichst vermieden sind. Man konstruiert jetzt Dynamos von jeder gewünschten Stärke.

154. Verwendung der Dynamomaschine zur Galvanoplastik.

Man verwendet solche Maschinen zur Galvanoplastik in großen Anstalten für galvanisches Versilbern, Vergolden, Vernickeln, Verkupfern 2c. anstatt der teuren Batterien. Da es hiebei darauf ankommt, möglichst viel Metall niederzuschlagen, die Menge des Metalles aber direkt proportional ist der Menge der durchfließenden Elektrizität (Faraday), so sucht man eine möglichst große Stromstärke zu erzielen; da nun der äußere Widerstand in den kurzen Zuleitungsdrähten und in den großen Bädern mit den breiten Elektroden sehr klein ist, so macht man auch den inneren Widerstand sehr klein; man macht also wenig Windungen am Gramme'schen Ringe, etwa bloß 24 Gruppen à 1 oder 2 Windungen, macht dafür die Drähte sehr dick, so daß sie

wie Kuperstäbe oder -barren aussehen, und gibt auch den Elektromagneten nur wenige Windungen, aus dicken Kupferstäben bestehend. Die elektromotorische Kraft ist dann nicht bedeutend, aber, da der Gesamtwiderstand sehr klein ist, ist die Stromstärke doch sehr groß, und auch die Elektromagnete werden trotz der wenigen Windungen stark magnetisch.

Mittels solcher durch Dampfmaschinen betriebener Maschinen scheidet man metallisches Kupfer aus dem bergmännisch gewonnenen Kupfersulfat aus, und erhält dabei sehr reines Kupfer, da es frei ist von Schlacken und anderen Metallen. Man gewinnt durch eine Maschine, die 6—8 Pferdekräfte erfordert, täglich 5—6 Ztr. Kupfer. Mit solchen Maschinen wird fabrikmäßig versilbert, vergoldet und vernickelt, und nur die Billigkeit des dadurch erzeugten Stromes ermöglicht die weite Verbreitung und allgemeine Verwendung galvanisch versilberter und vernickelter Gegenstände.

155. Wärmewirkung des elektrischen Stromes.

Bevor wir das elektrische Licht besprechen, ist es notwendig, die Wärmewirkung des galvanischen Stromes zu betrachten. **Stets wenn ein elektrischer Strom einen Leiter durchfließt, erzeugt er in demselben Wärme;** man fühlt sie an einem Stücke dünnen Kupferdrahtes; man sieht ihre Wirkung an einem feinen Kupferdraht, da er durch den Strom glühend gemacht, ja sogar geschmolzen werden kann. Sind in demselben Stromkreise mehrere Leiter von verschiedenem Widerstande nach einander eingeschaltet, wie etwa dünnere und dickere Drähte, so wird in den Teilen, welche den größeren Widerstand besitzen, auch mehr Wärme erzeugt. Gerade so, wie sich in einem solchen Falle das Gefälle auf die einzelnen Teile des Leiters verteilt, so daß derjenige Leiter, der den größeren Widerstand hat, auch das größere Gefälle hat, ebenso verteilt sich auch die erzeugte Wärmemenge; die in zwei Stücken desselben Stromkreises erzeugten Wärmemengen (Kalorien) verhalten sich gerade so, wie die auf diesen Stücken verbrauchten Beträge des Gefälles. Diese Wärmemengen erscheinen als Äquivalente für die im Gefälle verschwundenen Potenzialdifferenzen. Da aber das Gefälle dem Widerstande proportional ist, so folgt: **In demselben Stromkreise verhalten sich die Wärmemengen zweier Leitungsstücke wie deren Widerstände.** Dies gilt in demselben Stromkreise, also bei derselben Stromstärke oder bei Strömen von gleicher Stärke.

Um zu untersuchen, wie die Wärme von der Stromstärke abhängt, wenn das Gefälle dasselbe ist, verzweigt man den Strom zwischen den Punkten a und b, so daß der Widerstand des Zweiges acb etwa halb so groß ist als der Widerstand des Zweiges adb; es ist dann das Gefälle auf beiden Zweigen dasselbe, die Stromstärke

aber im Zweige acb zweimal so groß als im Zweige adb. Man findet dann, daß auch die Wärmemenge (Kalorien) im Zweige acb zweimal so groß ist als im Zweige adb, schließt also, **bei demselben Gefälle ist die Wärme der Stromstärke proportional.** Verbindet man beide Sätze, so findet man folgendes: Soll in einem und demselben Drahtstücke die Stromstärke doppelt so groß werden, so muß, da der Widerstand des Drahtstückes nicht geändert wird, das Gefälle doppelt so groß werden. Es wird also erstens eine zweimal größere Potenzialdifferenz verbraucht, deshalb also zweimal mehr Wärme erzeugt; aber zweitens, es fließt nicht bloß dieselbe Elektrizitätsmenge durch, sondern eine zweimal größere; also nicht bloß von einer Elektrizitätsmenge wird eine doppelte Potenzialdifferenz verbraucht, sondern von einer doppelten Elektrizitätsmenge wird je die doppelte Potenzialdifferenz verbraucht, deshalb ist die Wärme viermal größer $= 2^2$. Man findet so allgemein: **die in einem und demselben Drahtstücke erzeugte Wärmemenge ist dem Quadrate der Stromstärke proportional.** (Joule.) Dieser Satz kann auch auf einen ganzen Stromkreis ausgedehnt werden. Hat man ein Element in einem Stromkreise von gewissem Widerstand $a+i$, äußeren und inneren zusammengezählt, so erhält man einen gewissen Strom; dieser liefert im ganzen Stromkreise eine gewisse Menge Wärme, die der Menge des verbrauchten Zinkes entspricht. Man nimmt nun 2 Elemente, verbindet sie auf elektromotorische Kraft und bewirkt durch Verkleinerung des äußeren Widerstandes, daß der Gesamtwiderstand, $2i+a'$, gerade so groß ist wie vorher $i+a$; da man nun doppelte elektromotorische Kraft bei demselben Widerstand hat, so hat man doppelten Strom (Ohmsches Gesetz) und erhält vierfache Wärmemenge (Joule). Dies entspricht nun genau der verbrauchten Menge Zink; denn bei doppelter Stromstärke muß in einem Elemente doppelt so viel Zink verbraucht werden, so viel aber in dem einen Elemente Zink verbraucht wird, eben so viel wird auch in dem andern verbraucht; also vierfache Menge des verbrauchten Zinkes, daher vierfache Wärmemenge. Also der allgemeine Satz: die in einem Stromkreise von gewissem Widerstand oder einem Stromteile erzeugte Wärmemenge ist dem Quadrat der Stromstärke proportional.

156. Das elektrische Bogen- oder Kohlenlicht.

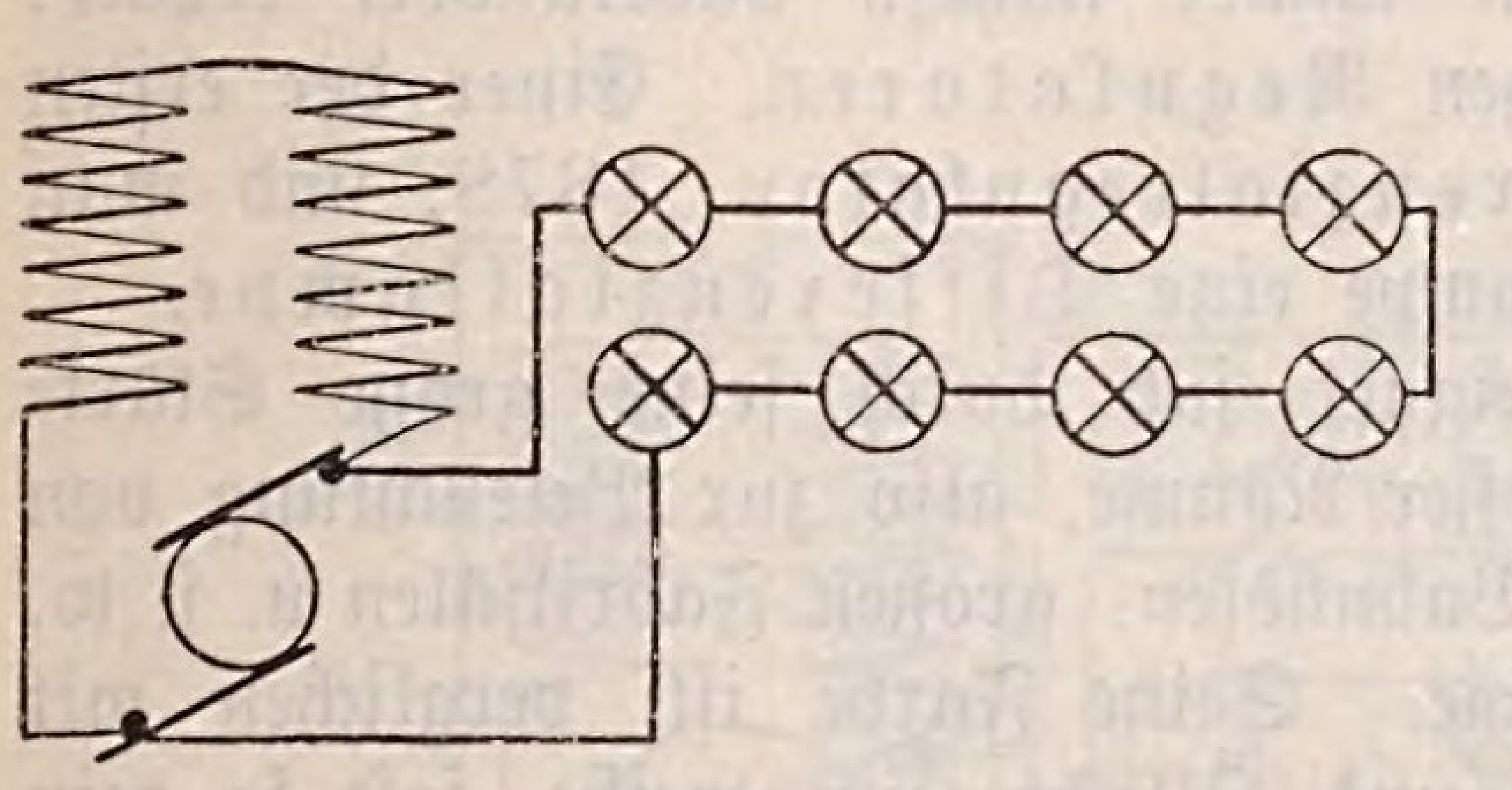
Das elektrische Licht wurde erfunden von Davy 1808. Man leitet den Strom in zwei Stäbe aus dichter Gaskohle (Retortenkohle, galvanische-), bringt diese in Berührung und entfernt sie nun ein wenig, so wird dadurch der Strom nicht unterbrochen, sondern er besteht weiter, und es bildet sich zwischen den Enden der Kohlenstäbe ein intensiv glänzendes Licht, das elektrische Licht. Es werden nämlich durch den elektrischen Strom feinste Teilchen

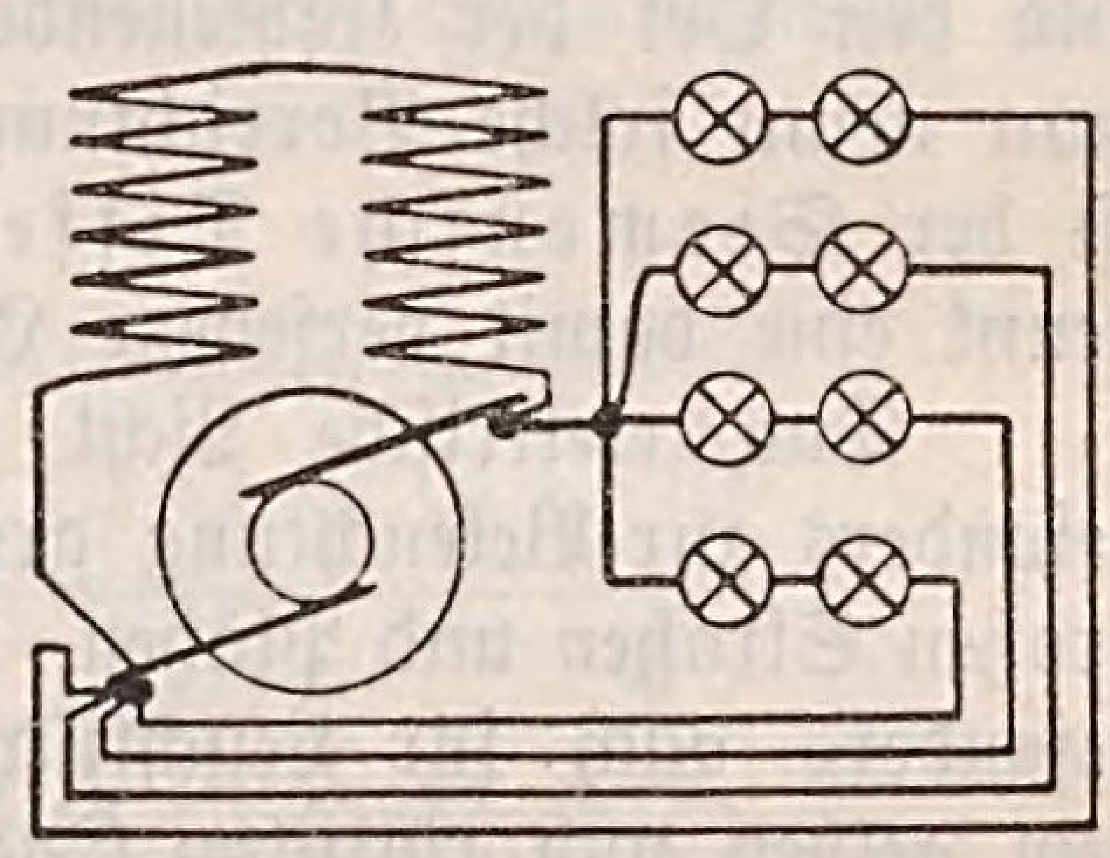
von den Kohlenstäben losgerissen und durch die Luft von Pol zu Pol geführt, und diese Teilchen bilden nun den Leiter, durch welchen der Strom fließt.


Fig. 198.

Der Widerstand dieses Leiters, da er bloß aus sehr kleinen Kohlenteilchen besteht, ist aber sehr hoch, gewöhnlich ca. 6 Ohm; deshalb ist das Gefälle auf ihm sehr groß, also die Wärmemenge groß; und da dieselbe noch dazu nur zur Erhitzung der an Masse geringen Kohlenteilchen verwendet wird, so werden dieselben ungemein hoch erhitzt und senden ein sehr helles Licht aus. Da die Kohlenteilchen in etwas gebogener Linie von einem Kohlenstücke zum andern laufen, so nennt man das Licht auch das elektrische **Bogenlicht**, oder den elektrischen **Lichtbogen**. Die Hitze ist so groß, daß Platindraht, in den Lichtbogen gehalten, sofort schmilzt. Das Licht selbst ist sehr stark; schon das schwächste derartige Licht ist so stark wie ca. 200 Normalkerzen, von denen etwa 13—15 so stark leuchten wie eine gewöhnliche Gasflamme. Gewöhnlich wendet man es in der Stärke von ca. 1000 NK. an, kann aber seine Leuchtkraft bis 40000 NK. steigern. Beim Abbrennen höhlt sich die positive Kohle trichterförmig aus (Krater), wird dort heftig weißglühend und wirft viel Licht nach abwärts. So gibt eine Siemenslampe bei 4—5 *mm* Lichtbogen horizontal 580 Kerzen, unter 45° nach abwärts 3830 Kerzen und liefert für eine Pferdekraft 344 bezw. 2300 NK.

So lange man den zur Speisung des elektrischen Lichtes nötigen Strom durch galvanische Batterien herstellen mußte, war das elektrische


Fig. 199.


Fig. 200.

Licht zur größeren Anwendung nicht geeignet, weil es zu teuer kam. Erst seit der Erfindung der magnetelektrischen Maschinen und insbesondere der Dynamomaschinen war es möglich, den Strom so billig zu liefern, daß das elektrische Bogenlicht sogar billiger kommt als Gaslicht von gleicher Lichtstärke. Man verwendet dazu mächtige Dynamomaschinen, zu deren Betrieb mehrere Pferdekräfte erforderlich sind, und kann im allgemeinen annehmen, daß je 0,7 Pferdekraft für je ein Bogenlicht à 1000 NK. ausreicht.

Sollen durch eine Dynamomaschine mehrere elektrische Lampen gespeist werden, so schaltet man die Lampen entweder hintereinander, *Serienschaltung*, wobei dann die Dynamomaschine, da jede Lampe ca. 50 V Spannung verbraucht, so vielmal 50 V Spannungsdifferenz an den Polklemmen geben muß, als Lampen eingeschaltet sind; die Stromstärke braucht aber nur 8—9 Amp. zu sein. Oder man verzweigt den Strom in so viele Zweige als Lampenpaare vorhanden sind; jeder Zweig speist dann zwei hinter einander geschaltete Lampen oder nur eine Lampe von doppelter Lichtstärke; die Lampenpaare sind parallel geschaltet, *Parallelschaltung*; die Maschine liefert 100—110 V, aber so vielmal 8—9 A, als Lampenpaare vorhanden sind. Die Fig. 199 und 200 geben in der in der Technik gebräuchlichen Art diese zwei Schaltungen an.

Die beiden Kohlenstäbe werden dadurch, daß von ihnen stets kleine Teilchen weggerissen werden, die dann verbrennen, stets kürzer und brennen auch deshalb ab, weil sie besonders an den Enden sehr heiß sind. Dadurch wird ihr Abstand immer größer, der Lichtbogen immer länger, sein Widerstand größer und bald so groß, daß die Stromstärke nicht mehr hinreicht, um den Lichtbogen zu erhalten: die Lampe erlischt dann plötzlich. Um dies zu verhindern, müssen die Kohlenstäbe immer wieder um ebensoviel einander genähert werden, als sie abbrennen, und da noch dazu der positive Kohlenstab doppelt so rasch abbrennt als der negative, so muß, wenn man das Licht immer in demselben Punkte haben will, die Bewegung des + Stabes doppelt so groß sein als die des Stabes. Man hat sinnreiche Vorrichtungen erfunden, durch welche der die Lampe speisende Strom nach Bedarf selbst die Bewegung der Kohlenstäbe hervorbringt, also den Abstand und den Ort der Kohlenenden immer nahezu unverändert erhält; man nennt solche Vorrichtungen *Regulatoren*. Einer der ersten ist der *Siemensche Differenzialregulator*, 1878, und man nennt eine damit versehene Lampe eine *Differenziallampe*.

Das elektrische Licht eignet sich durch seine große Stärke besonders zur Beleuchtung großer Räume, also zur Beleuchtung von großen Straßen und Plätzen, Bahnhöfen, großen Fabriksälen u. s. w. besonders auch für Leuchttürme. Seine Farbe ist, verglichen mit dem gelben und rötlichen Gas und Öllicht, eine weiße, fast so rein weiß wie Sonnenlicht.

Unpassend ist das elektrische Bogenlicht zur Beleuchtung kleiner Räume, wie unserer Wohnräume, da seine Lichtstärke zu groß ist und es noch nicht gelungen ist, es auf mehrere Lampen mit passend kleinen Lichtstärken zu verteilen.

157. Das elektrische Glühlicht.

Die *Glühlampe* (Edison) besteht aus einem kugel- oder birnförmigen Glasgefäß; in dieses führen zwei eingeschmolzene

Platindrähte, deren innere Enden durch eine dünne Kohlenfaser verbunden sind. Die Glaskugel ist verschlossen und vollständig luftleer. Leitet man man den Strom mittels der Platindrähte durch die Kohlenfaser, so wird sie glühend, ohne zu verbrennen, weil keine Luft vorhanden ist. Die glühende Kohlenfaser strahlt dabei ein schönes, mildes, einem guten Gaslichte vergleichbares Licht aus, gewöhnlich in der Stärke von 16 NK. (Edisons A Lampe), also etwa gleich einem guten guten Gaslicht (die kleinere Edinsonsche B Lampe liefert 8 NK). Die Kohlenfaser wird hergestellt, indem man eine Holzfaser von Bambursrohr bei Luftabschluß glüht und so in Kohle verwandelt, (Edinson). Doch hat man auch noch andere Methoden, Kohlenfasern herzustellen.

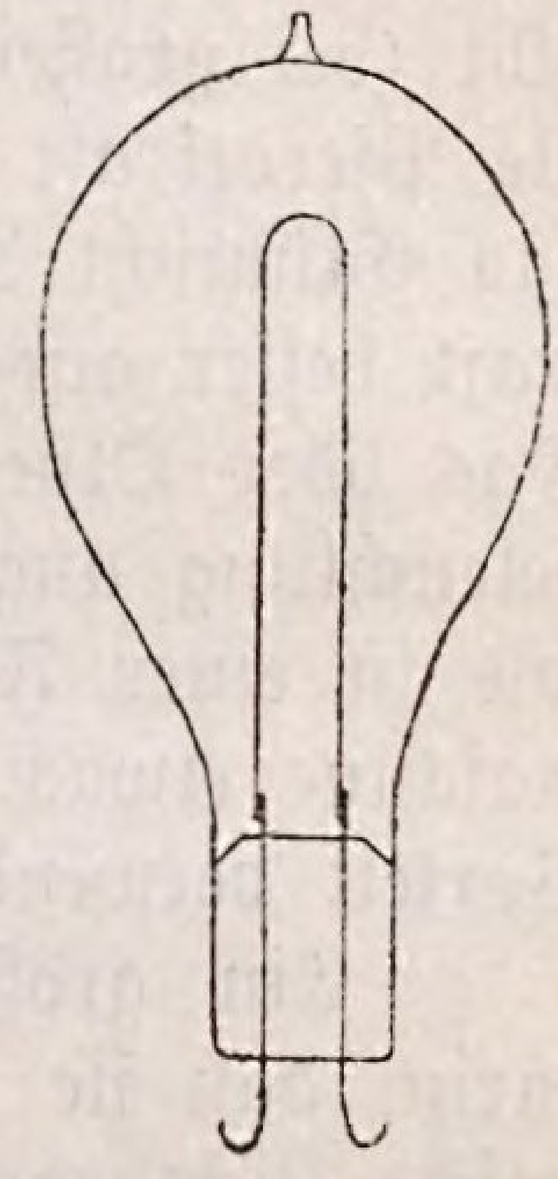


Fig. 201.

Soll durch eine Maschine eine größere Anzahl Glühlichter gespeist werden, so werden sie stets parallel geschaltet; die zwei Zuleitungsdrähte laufen nebeneinander her und von ihnen zweigen kurze Drähte zu jedem Lämpchen ab. Die gewöhnlichen Glühlampen erfordern eine Spannungsdifferenz von 100—110 V. Man richtet es deshalb meist so ein, daß die Maschine 110 V liefert; dann kann man wie in Fig. 203 angedeutet, mehrere Leitungen mit parallel geschaltenen Glühlichtern abzweigen, nach Bedarf entweder zwei hinter einander geschaltete Bogenlampen, oder

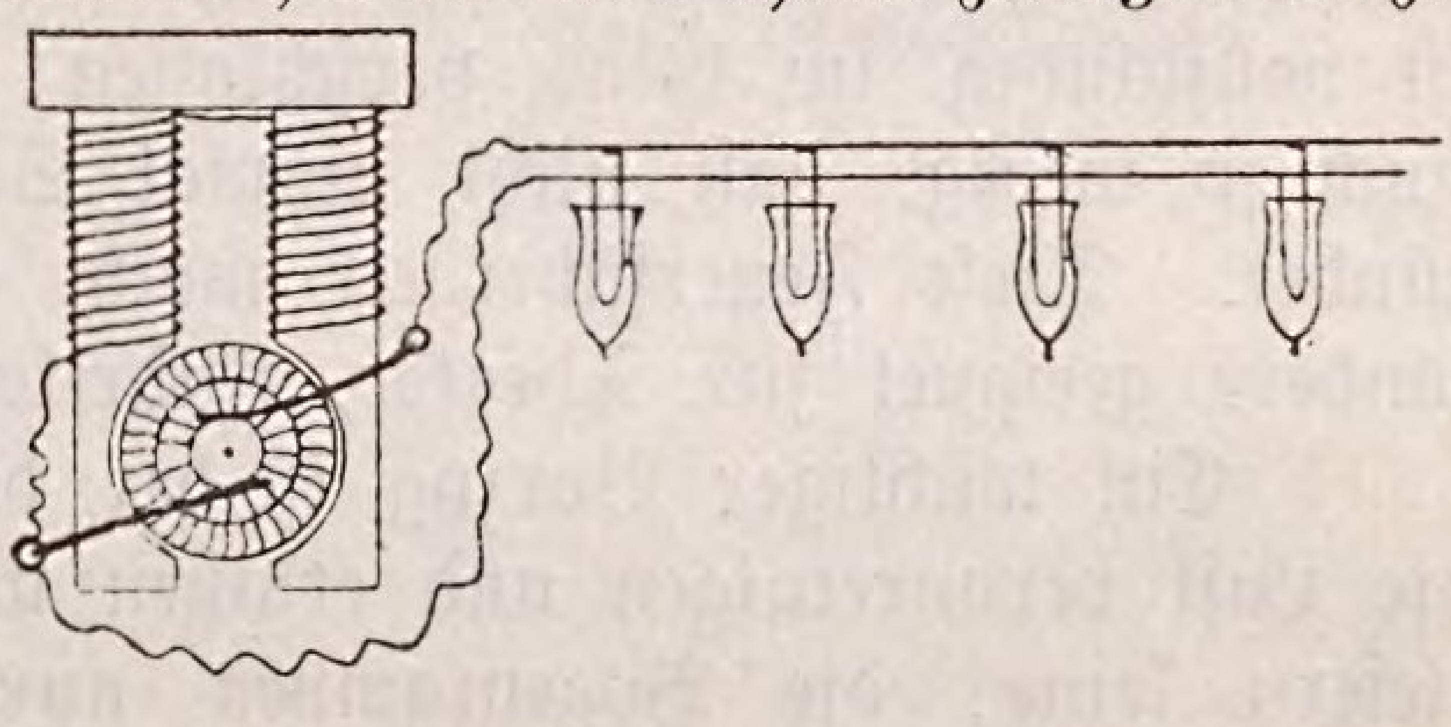


Fig. 202.

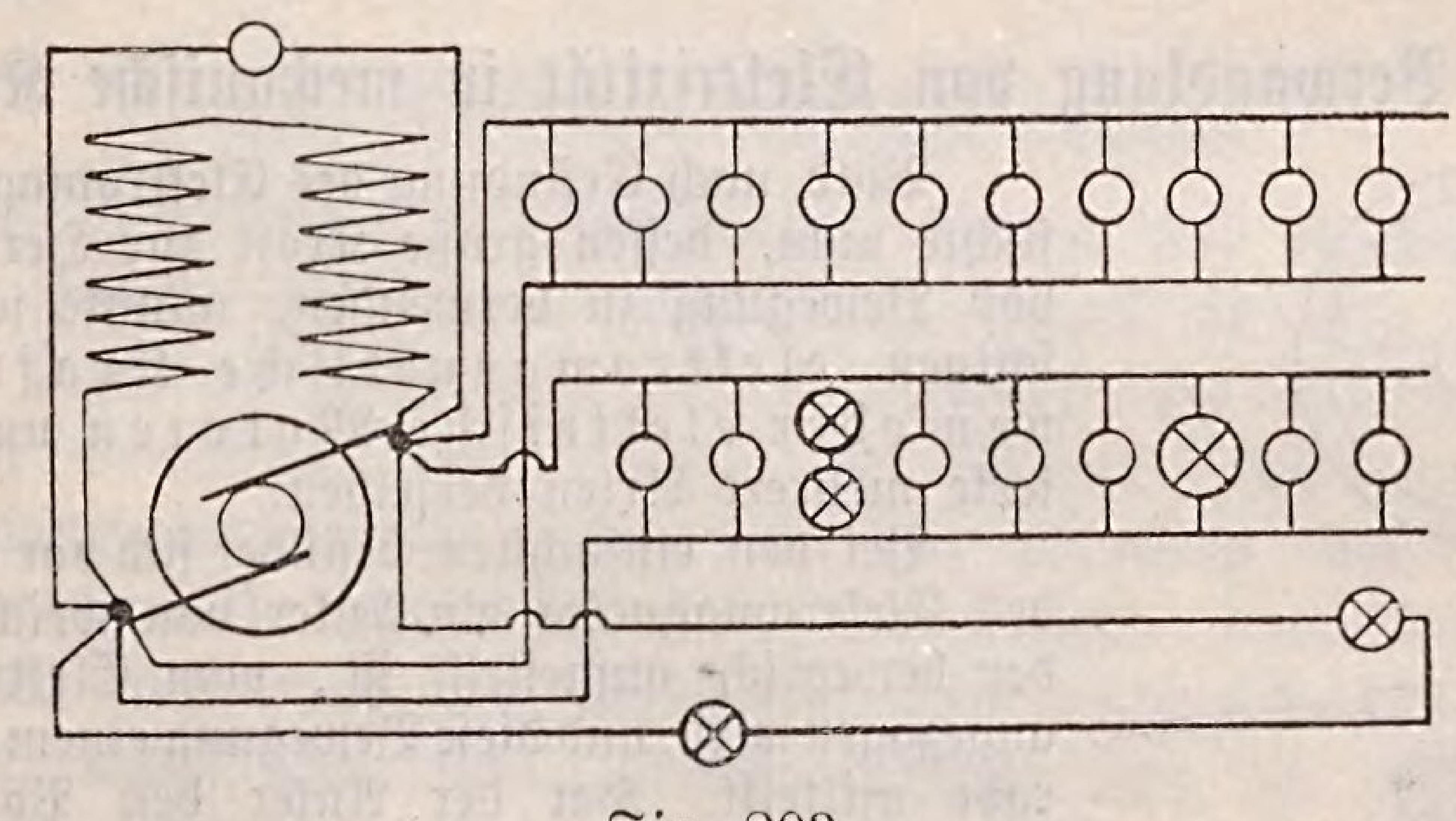


Fig. 203.

eine 16 A Lampe, oder eine 8 A Lampe mit Zusatzwiderstand einschalten, oder eigene Leitungen zu solchen Lampenpaaren abzweigen, und erhält so eine gemischte Beleuchtungseinrichtung.

Die Glühlampen stellen sich viel teurer als die Bogenlichter; mit einer Pferdekraft erzeugt man einen Strom, der bloß für 10 bis 13 A Lampen ausreicht, also bloß 10 · 16 = 160 NK. Licht gibt (bei großen Maschinen bis 200 NK. pro Pferdekraft) während die Pferdekraft beim Bogenlichte ca. 1400 NK. liefert. Dafür hat das Glühlicht den Vorteil, daß es besser verteilt und so seine Leuchtkraft besser ausgenützt werden kann. Es ist aber stets noch teurer als Gas oder Ölbeleuchtung und wird demnach meist nur zu Luxusbeleuchtung angewandt; nur wenn man die Betriebskraft billig hat, wie in einer Fabrik oder einem Dampfschiffe, wo bloß die Dampfmaschine etwas stärker angeheizt zu werden braucht, wird es mit Vorteil verwendet.

Ein großer Vorteil beider Arten elektrischen Lichtes besteht darin, daß sie nicht feuergefährlich sind. Zwar ist der elektrische Lichtbogen ungemein heiß, aber die ganze Lampe kann mit einer Glaskugel umgeben werden, die fast luftdicht schließt und das Hineinfallen brennbarer Körper in die Flamme vollständig hindert; die Glaskugel erwärmt sich dabei nur unmerklich. Das Glühlicht ist vollständig im Glas verschlossen, und das Glas erwärmt sich auch so wenig, daß nicht einmal Schießbaumwolle daran sich entzündet. Diese Feuersicherheit macht die elektrische Beleuchtung besonders geeignet für Theater, Fabriken, Schiffe u. s. w.

Ein wichtiger Vorzug ist der, daß die elektrischen Lampen nicht die Luft verunreinigen und erhitzen wie Gas- und Öllampen. Sie liefern keine, die Bogenlampen nur unbedeutende Verbrennungsprodukte, und die Wärme, die sie liefern, beträgt für je 100 NK. in der Stunde bei Bogenlampen ca. 100, bei Glühlichtern ca. 400 Kalorien, während Gas bei derselben Lichtstärke 1500 bis 12000, Petroleum 3400 bis 7000 Kalorien erzeugt.

158. Verwandlung von Elektrizität in mechanische Kraft.

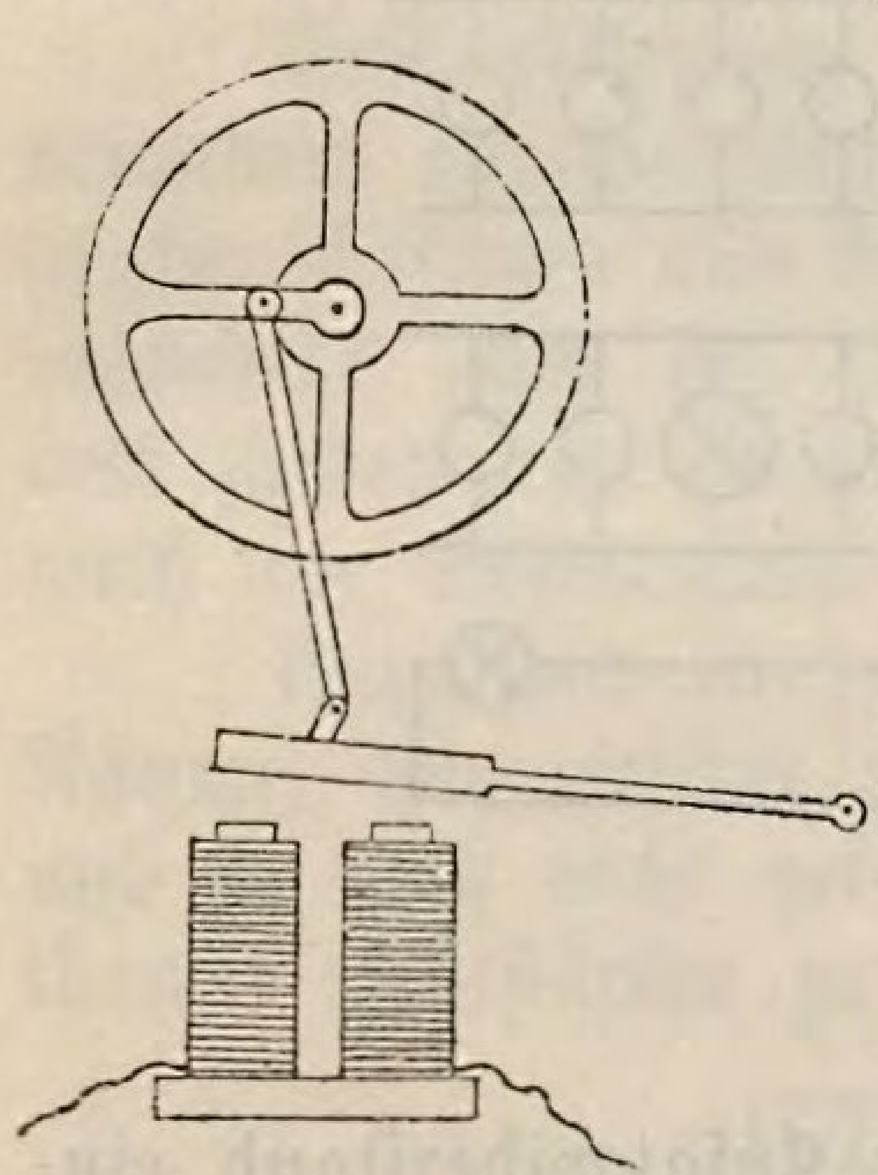


Fig. 204.

Bald nach Erfindung des Elektromagnetes versuchte man, dessen große Kraft zur Hervorrufung von Bewegung zu verwenden, nannte solche Maschinen elektromagnetische Kraftmaschinen oder elektrische Motoren und konstruierte mehrere Arten derselben.

Bei den einfachsten befindet sich vor den Polen des Elektromagnetes ein Anker von weichem Eisen, der beweglich aufgestellt ist, vom Elektromagnete angezogen wird, und diese Bewegung einem Schwungrade mitteilt. Hat der Anker den Pol erreicht, so wird der Strom unterbrochen, und das Schwungrad zieht den Anker wieder von den unmagnetischen Polen weg. Nun wird der Strom wieder geschlossen, und es beginnt dasselbe Spiel.

Oder man nahm einen kräftigen Hufeisenmagnet, stellte ihn vertikal, und brachte zwischen die Pole einen stabförmigen

Elektromagnet, der um eine vertikale Achse leicht drehbar aufgestellt wurde. Der Strom wird so eingeleitet, daß die Pole des Elektromagnetes gleichnamig sind den Polen des Stahlmagnetes; deshalb werden sie abgestoßen, der Elektromagnet dreht sich und wird nun von den andern Polen angezogen; sobald die Pole des Elektromagnetes an die ungleichnamigen Pole des Stahlmagnetes gekommen sind, bewirkt ein einfacher Kommutator (Halbscheiben mit Kontaktfedern, wie beim Siemens-Induktor beschrieben), daß der Strom nun in entgegengesetzter Richtung den Elektromagnet durchfließt, also seine Pole umkehrt; er wird deshalb von den Polen des Stahlmagnetes wieder abgestoßen, macht die zweite halbe Drehung, und so geht es fort.

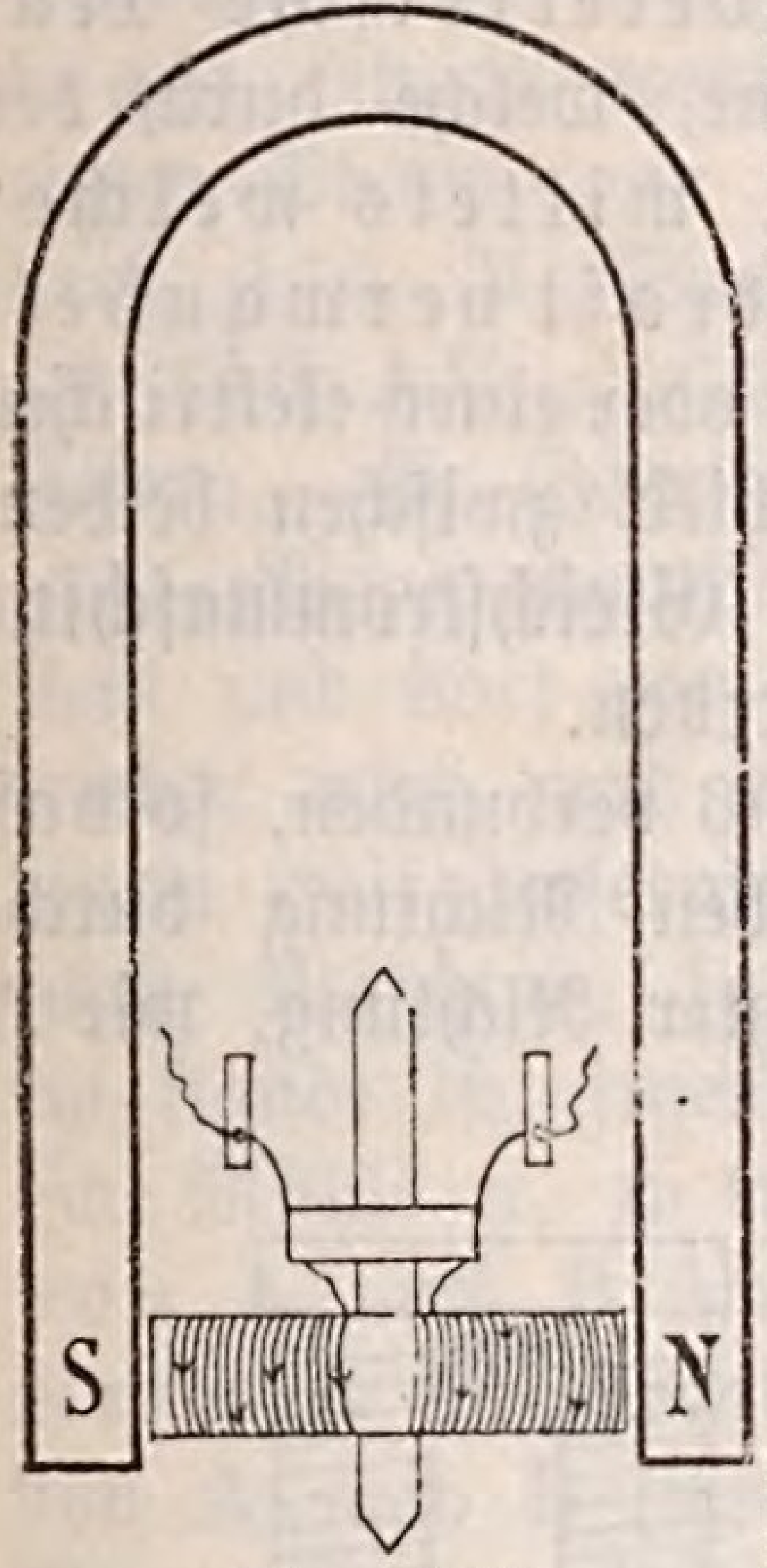


Fig. 205.

Man ersetzte den Stahlmagnet durch einen kräftigen Elektromagnet, dessen Strom aber keinem Wechsel ausgesetzt wurde, so daß dessen Pole ungeändert blieben wie die Pole des Stahlmagnetes; dadurch erzielte man noch kräftigere Wirkungen. Man brachte anstatt zweier Elektromagnetpole deren mehrere, 4 oder 6 in einem Kreise an, und brachte ebenso auf der Achse eine gleiche Anzahl von Elektromagnetpolen, 4 oder 6 an, sorgte ebenso dafür, daß die Pole sich abstoßen und die Ströme zur rechten Zeit gewechselt wurden.

Den Strom nahm man aus einer Batterie, konnte leicht eine umdrehende Bewegung hervorbringen und sie dazu benützen, um eine Arbeitsmaschine damit zu treiben. So war Jakobi in Petersburg (1849) im stande, mittels seines elektrischen Motors ein Boot auf der Newa zu bewegen. Man hoffte, durch praktische Einrichtung der Motoren es dahin zu bringen, daß die durch dieselben erzeugte Arbeit billiger würde als die der Dampfmaschinen. Doch war das nicht zu erreichen. Denn die galvanischen Batterien verbrauchen ein viel zu teures Material (Zink, Schwefelsäure u. s. w.), so daß sie, wenn man auch die elektrische Kraft sehr gut ausnützt, doch nur weniger Arbeit liefern als für dasselbe Geld die Dampfmaschine, trotzdem sie ihr Brennmaterial sehr schlecht ausnützt (Liebig).

Die Erfindung der magnetelektrischen und der Dynamo-Maschine gab Anlaß, diese Frage nochmals zu prüfen, und führte so zur elektrischen Kraftübertragung.

159. Elektrische Kraftübertragung.

Die elektrische Kraftübertragung beruht auf folgenden Vorgängen. Leitet man einen elektrischen Strom in eine Dynamomaschine, so wird dadurch der Gramme'sche Ring in Umdrehung versetzt; denn durch den Strom wird zunächst der Elektromagnet magnetisch; aber auch der Eisenkern des Gramme'schen Ringes wird magnetisch und zwar, wenn etwa die Schleiffedern oben und unten sich befinden, kann man sich den Kern in 2 Hälften, rechts und links, zerlegt denken, und an der Art der Bewickelung desselben erkennt man, daß beide oben etwa Südpol und unten Nordpol haben. Beide Pole werden von den rechts und links stehenden Elektromagnetpolen abgestoßen resp. angezogen, deshalb kommt der Ring in Drehung und kann dann durch Riemen eine Arbeitsmaschine treiben. Es wird also die Energie des elek-

trischen Stromes zu mechanischer Arbeit verwendet. Man nennt, wie früher gesagt, diejenige Maschine, durch deren Umdrehen man den Strom erzeugt, welche also die aufgewandte Kraft in Elektrizität verwandelt, eine dynamoelektrische Maschine, und nennt dementsprechend die Maschine, welche durch den elektrischen Strom in Umdrehung versetzt wird, mittels welcher also der elektrische Strom wieder in Kraft verwandelt wird, eine elektrodynamische Maschine oder einen elektrischen Motor. In der Konstruktion ist kein Unterschied zwischen beiden, **jede dynamoelektrische oder magnetelektrische Gleichstrommaschine kann auch als elektrodynamische verwendet werden.**

Hat man zwei Maschinen wie in Figur 206 verbunden, so daß beide vom Strome der Maschine A in derselben Richtung durchflossen werden, so dreht sich B in entgegengesetzter Richtung, wie A

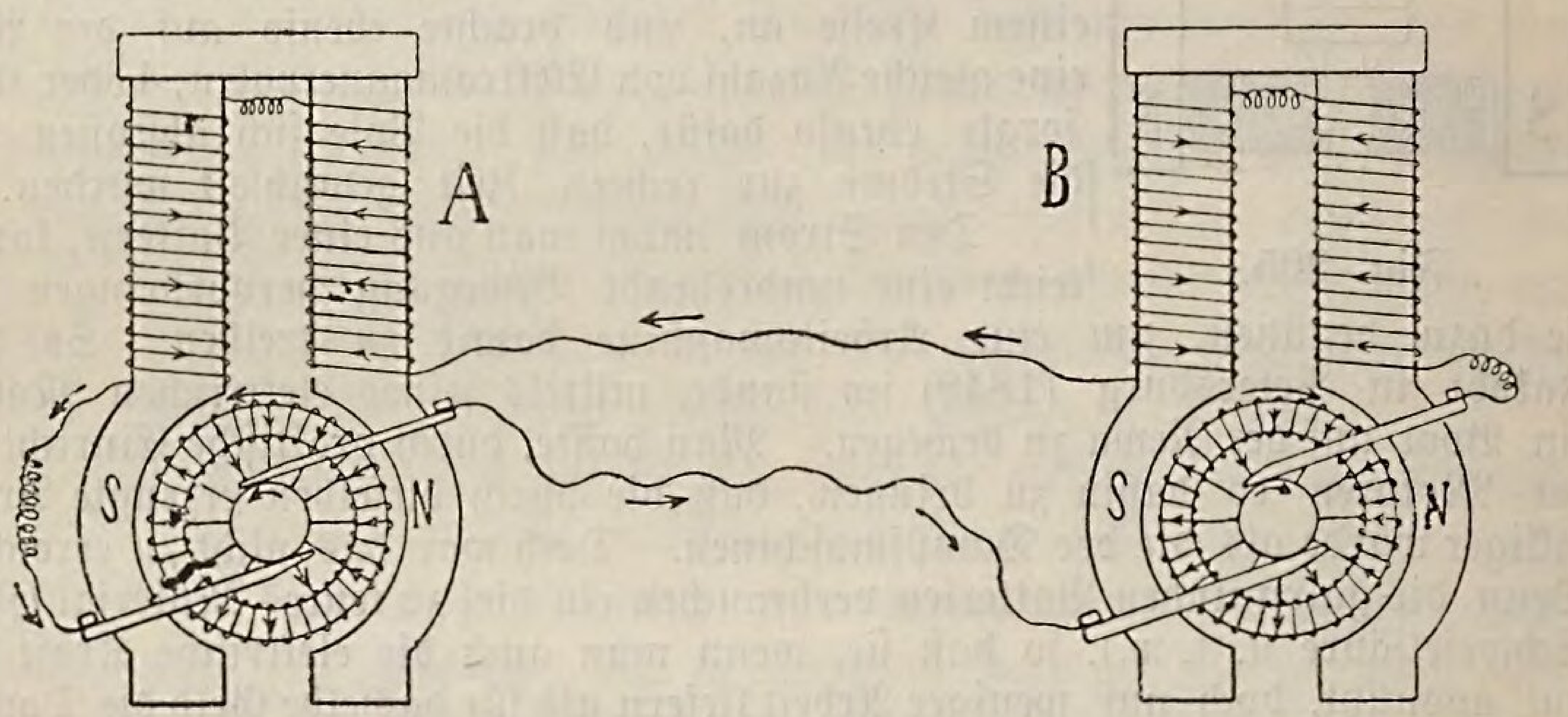


Fig. 206.

gedreht wird. Umgekehrt: dreht man B in derselben Richtung wie vorher A, so daß im Stromkreise nun wieder ein Strom von derselben Richtung läuft, so dreht sich nun A in entgegengesetzter Richtung.

Es wird wirklich ein Teil der elektrischen Energie dazu verbraucht, um die mechanische Kraft zu liefern. Denn wenn die elektodynamische Maschine gesperrt, d. h. am Umdrehen gehindert ist, etwa durch Dazwischenschieben eines Stabes, und man leitet durch sie den Strom, so werden wohl die Eisenkerne magnetisch, es kann aber keine Bewegung eintreten, folglich verläuft der Strom wie gewöhnlich in freier Leitung, das Gefälle verteilt sich nach den Ohm'schen Gesetzen auf die einzelnen Drähte der Bewickelungen und der Leitung, und die ganze Energie des Stromes wird bloß zu Wärmeerzeugung in diesen Drähten verbraucht. Läßt man aber die elektrodynamische Maschine gehen, so wird ein Teil des Gefälles verbraucht, um die umdrehende Kraft zu liefern. Über

die Größe der erzeugten Arbeit gilt derselbe Satz wie früher. Eine dynamoelektrische Maschine liefert für jede Pferdekraft einen Strom von 735 AV (etwas weniger); jede elektrodynamische Maschine liefert für je 735 AV eine Pferdekraft (etwas weniger). Z. B. ein elektrischer Motor wird von einem Strom von 40 A gespeist, welcher an seinen Polklemmen noch 110 V Spannungsdifferenz zeigt; er verbraucht demnach $40 \cdot 110$ AV = 4400 AV und sollte dafür fast 6 Pferdekräfte liefern. Er liefert bei guter Konstruktion deren 5.

Wenn nun die dynamoelektrische Maschine an einem Orte A steht und dort von einer Dampfmaschine oder einer Wasserkraft getrieben wird, und man leitet die dadurch erzeugte Elektrizität nach einem weit entfernten Orte B zu der dort befindlichen elektrodynamischen Maschine, so daß dieselbe dadurch umgedreht wird und so im stande ist, irgend eine Arbeit zu leisten, z. B. eine Drehbank, eine Mühle ꝛc. zu treiben, so sagt man, die Kraft ist elektrisch von A nach B übertragen worden. Es geht naturgemäß von der in A aufgewendeten Arbeit ein Teil verloren; denn zum Fließen von A nach B (und wieder zurück) braucht die Elektrizität ein Gefälle, und der Betrag desselben wird der durch die Maschine A erzeugten Potenzialdifferenz entnommen, wird in den Leitungsdrähten in Wärme verwandelt und geht so verloren; nur der noch übrig bleibende Betrag der Potenzialdifferenz wird in B in Arbeit verwandelt. Ist die Entfernung von A nach B nicht groß, bloß einige Kilometer, und der Leitungsdraht dick, so erhält man leicht 50% der in A aufgewendeten Arbeit in B wieder. Ist die Entfernung aber groß, so geht viel durch das Gefälle verloren, und der Nutzeffekt sinkt. Ist eine Stadt mit elektrischer Beleuchtung eingerichtet, so kann ein Kleingewerbetreibender die Elektrizität dazu benützen, um eine elektrodynamische Maschine zu treiben und dadurch seine Arbeitsmaschinen bewegen zu lassen; da dieselbe keinen großen Raum einnimmt, keine besondere Bedienung erfordert, überall leicht aufgestellt werden kann, fast geräuschlos arbeitet und niemand belästigt, so hat sie große Vorzüge vor einer Dampfmaschine oder einem Gasmotor, und wird deshalb gerne angewendet. Elektrische Aufzüge, elektrische Krahnen ꝛc. führt man aus ähnlichen Gründen ein.

Hieher gehören auch die elektrischen Eisenbahnen, die sich besonders für kürzere Strecken, unterirdische Bahnen, Straßenbahnen ꝛc. eignen. An einem Waggon befindet sich die elektrodynamische Maschine, welche ihre Bewegung dem Rade des Wagens überträgt und diesen dadurch fortbewegt. Der Strom wird erzeugt durch eine dynamoelektrische Maschine, die sich auf der Station befindet und etwa durch eine Dampfmaschine getrieben wird; der Strom wird dann in einen Draht geleitet, der wie ein Telegraphendraht neben der Bahn herläuft. Auf diesem Drahte sitzt ein kleiner

Wagen, von dem ein Draht in den Waggon zur elektrodynamischen Maschine läuft; so kommt der Strom in diese Maschine, und wenn sich nun der Waggon bewegt, zieht er den kleinen Wagen längs des Drahtes mit fort, so daß der Strom stets geschlossen ist. Die Rückleitung wird durch die Erde besorgt.

Solche elektrische Eisenbahnen haben viele Vorzüge: sie gehen fast geräuschlos, was sie zu Straßenbahnen in großen Städten besonders tauglich macht, sie erzeugen keinen Rauch, weshalb sie für Tunnels, unterirdische Eisenbahnen und Bergwerke sehr geeignet sind; sie brauchen weder Lokomotive noch Tender, wodurch das Gewicht des Zuges erheblich verringert und ermöglicht wird, Brücken und Dämme leichter zu bauen; sie benützen statt der Lokomotive, die ja eine schlechte Dampfmaschine ist, eine viel bessere, stehende Maschine; jedoch geht von diesem Gewinne wieder viel verloren durch die Umwandlung der Kraft in Elektrizität und wieder in Kraft, sowie durch den Aufwand von Gefälle in der Leitung.

160. Die Sekundärelemente der Akkumulatoren.

Schaltet man in den Strom einer Batterie ein Meidingerelement ein, so daß der +Pol der Batterie mit dem Zink, der —Pol mit dem Kupfer verbunden ist, also ebenso, wie wenn man es auf Intensität einschaltet, so geht Zn in Lösung, Cu aus Lösung; es entsteht dadurch elektromotorische Kraft, welche in demselben Sinne wirkt wie die elektromotorische Kraft der Batterie, dieselbe also verstärkt. Wenn man aber das Meidingerelement, das schon SO_4Zn in Lösung enthält, umgekehrt einschaltet, also so, daß der +Pol der Batterie mit dem Cu, der —Pol mit dem Zn verbunden wird, so ist das Cu die Anode, geht also in Lösung. Zn ist Kathode, an ihm wird Metall niedergeschlagen, und zwar Zink, also tritt jetzt der umgekehrte chemische Prozeß ein, Cu verbindet sich mit SO_4, SO_4 trennt sich von Zn. Dazu ist aber Kraft erforderlich, und diese wird genommen von der elektrischen Kraft des Batteriestromes, indem von der durch die Batterie erzeugten Potenzialdifferenz so viel genommen, also verbraucht wird, als zur Durchführung des chemischen Vorganges erforderlich ist. Nimmt man hiebei ein Meidingerelement, das schon verbraucht ist, bei dem also schon fast alles SO_4Cu verbraucht ist, so wird wieder SO_4Cu gebildet und Zn wird metallisch ausgeschieden; das Element wird wieder leistungsfähig. Wenn man dann die Batterie entfernt und das Meidingerelement in sich schließt, so liefert es wieder einen Strom, indem das vorher ausgeschiedene Zn wieder in Lösung geht und das SO_4Cu das Cu wieder abgibt. Ein Gramm Zn, das vorher ausgeschieden wurde, hat dazu eine gewisse Quantität Elektrizität verbraucht; genau dieselbe Quantität Elektrizität liefert es nun wieder, wenn es in Lösung geht;

zum Ausscheiden des Zn mußte von der elektrischen Potenzialdifferenz der Batterie ein gewisser Betrag weggenommen, also aufgewendet werden; genau dieselbe Potenzialdifferenz liefert dies Zn wieder, wenn es nun in Lösung geht. Man sieht also, von der elektrischen Kraft der Batterie ist durch das Meidingerelement ein Teil weggenommen und in Form der elektromotorischen Kraft des freien Zinkes aufgespeichert worden, und kann so bis zu beliebigem späteren Gebrauch aufbewahrt werden. Man nennt deshalb ein solches Element einen Aufspeicherer, Akkumulator der Elektrizität, oder ein sekundäres Element.

Nach Gaston Planté, dem Erfinder der Akkumulatoren, nimmt man 2 Bleiplatten, welche, wie später beschrieben wird, mit Bleioxyd überzogen sind, stellt sie in verdünnte Schwefelsäure, verbindet sie mit den Polen einer Batterie (oder einer Dynamomaschine) und ladet sie so: es entsteht zunächst eine Wasserzersetzung, an der mit dem — Pol verbundenen Platte, der Kathode, entsteht H_2, desoxydiert das Bleioxyd und reduziert es zu metallischem Blei; an der Anode wird O frei und verbindet sich mit dem Bleioxyd zu Bleisuperoxyd. Entfernt man nun die primäre Batterie, und verbindet die Pole der Bleiplatten, so liefern sie einen Strom; hiebei gibt das Bleisuperoxyd den überschüssigen Sauerstoff ab, derselbe wandert durch die Flüssigkeit und verbindet sich mit dem Blei der andern Platte zu Bleioxyd. Dabei wird ebenso wie vorhin die Platte, die beim Laden Kathode war, beim Entladen der — Pol, oder, bei der Platte, bei welcher die — E hineinkam, kommt sie auch wieder heraus. Der entstandene Strom ist also ein Polarisationsstrom.

Die Bleiplatten nehmen beim ersten Laden nur sehr wenig Sauerstoff auf. Wenn man aber das Laden und Entladen oftmal wiederholt, dabei einigemale die Pole umkehrt, und die Elemente auch einige Zeit geladen stehen läßt, so können die Platten immer mehr Sauerstoff aufnehmen. Die Platten werden dadurch gleichsam aufgelockert, eine immer dicker werdende Schichte der Bleiplatte nimmt am chemischen Prozeß teil, die Platten werden „formiert", und können dann große Quantitäten Elektrizität aufspeichern. Dies Formieren der Platten wird wesentlich abgekürzt, indem man nach Faure die Platte mit einem Brei von Mennig (Verbindung von Bleioxyd mit Bleisuperoxyd) überzieht oder umgibt.

Man verwendet solche Sekundärelemente, indem man sie durch eine Dynamomaschine ladet, um dann durch ihren Strom elektrisches Licht zu erzeugen, oder eine elektrodynamische Maschine treiben zu lassen, etwa zur Fortbewegung eines Trambahnwagens, eines Bootes rc.

Bei größeren elektrischen Beleuchtungsanlagen sind solche Akkumulatoren fast unentbehrlich, da sie ermöglichen, die Maschinen stets in gleicher Stärke gehen zu lassen; sie nehmen dann bei geringem Lichtbedarf die überschüssige Elektrizität auf und geben sie bei erhöhtem Lichtbedarf (abends) ohne großen Verlust wieder her.

Geschichtliches über Dynamomaschinen.

Aus der Geschichte der Erfindung dieser Maschinen ist folgendes das wichtigste:

Die erste magnetelektrische Maschine stellte Pixii 1832 her; bei ihr rotierte der Magnet vor den Induktionsspulen. Saxton änderte dies dahin ab, daß er die leichteren Induktionsspulen vor den Polen des festen Magnetes rotieren ließ und einen Kommutator anbrachte. Stöhrer verstärkte die Wirkung dieser Maschine, indem er mehrere Magnetpole (6) im Kreise anbrachte, und vor denselben eine Scheibe rotieren ließ, welche ebensoviele Induktionsspulen trug. Nollet vergrößerte diese Maschinen durch Anbringung von noch mehr Magnetpolen (64 und 96) und entsprechender Anzahl von Induktionsspulen; sie wurden von der Gesellschaft l'Alliance gebaut, heißen Alliance-Maschinen, und werden zur Erzeugung von elektrischem Bogenlicht auf Leuchttürmen verwendet.

Dr. Werner Siemens erfand 1857 den Cylinder-Induktor, Pacinotti in Florenz erfand 1860 den Ring-Induktor, doch wurde derselbe wenig bekannt.

Wilde in Manchester verbesserte 1866 die magnetelektrischen Maschinen auf folgende Weise: er stellte die elektrische Maschine aus zweien zusammen; die eine war eine magnetelektrische, bei der ein Siemens'scher Cylinder-Induktor zwischen permanenten Magneten rotierte; die andere war größer und ähnlich eingerichtet, nur waren die permanenten Magnete ersetzt durch einen mächtigen Elektromagnet, zwischen dessen Polen ebenfalls ein Siemens'scher Cylinder-Induktor rotierte; die durch die erste Maschine erhaltenen gleichgerichteten Ströme verwandte er, um den Elektromagnet der zweiten Maschine zu erregen; da derselbe dadurch sehr stark magnetisch wurde, so lieferte der zweite Induktor, der zwischen den Polen desselben rotierte, mächtige Ströme.

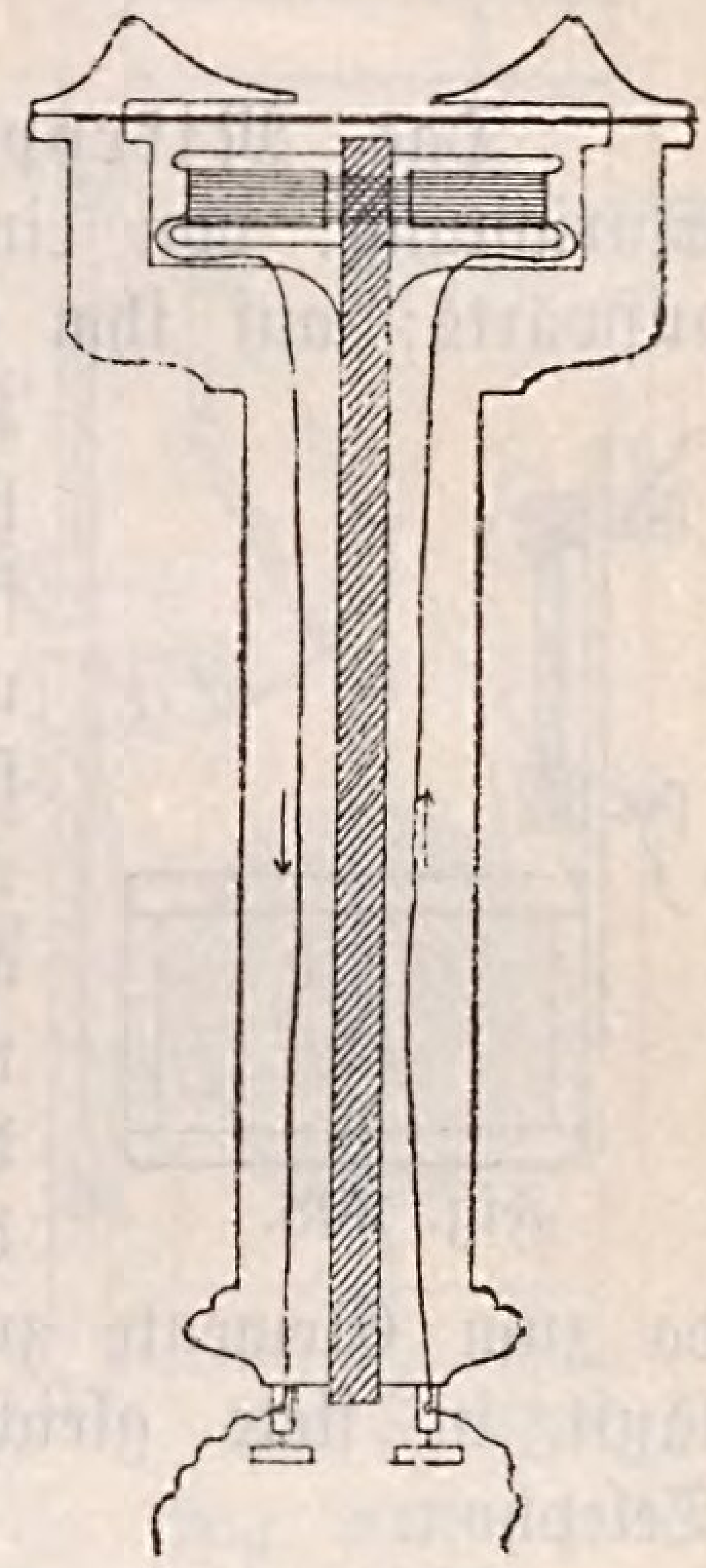
Das Prinzip der dynamoelektrischen Maschine, demgemäß der durch Rotation des Induktors erhaltene Strom selbst dazu verwendet wird, um die Elektromagnete zu erregen, wurde von Werner Siemens 1866 entdeckt, und gleichzeitig von Wheatstone. Beide veröffentlichten ihre Entdeckung in derselben Sitzung der „Royal Society" in London am 14. Februar 1867.

Gramme erfand 1871, ohne von Pacinotti's Erfindung Kenntnis zu haben, nochmals den Ringinduktor mit verbessertem Kollektor, und stellte Benützung des dynamischen Prinzips viele Maschinen von verschiedener Größe und für verschiedene Zwecke her. Seitdem werden von vielen Fabrikanten solche Maschinen hergestellt mit manchen Abänderungen und Verbesserungen; aber alle beruhen auf demselben Prinzip und haben daher im wesentlichen dieselbe Einrichtung.

161. Telephon.

Das Telephon oder der Fernsprecher dient dazu, die menschliche Sprache auf große Entfernungen zu übertragen. Das erste Telephon wurde von dem Lehrer Ph. Reiß (1861) erfunden, fand aber wenig Beachtung und deshalb keine Verbesserung. Das

von Graham Bell (1876) erfundene Magnettelephon hat folgende Einrichtung: Ein starker, stabförmiger Stahlmagnet ist an seinem oberen Ende durch eine Induktionsspule von sehr vielen Windungen eines feinen, isolierten Kupferdrahtes gesteckt. Die Enden des Drahtes führen zu zwei Klemmschrauben. Vor diesem Pole des Magnets ist ein dünnes Eisenblech so angebracht, daß es an seinen Rändern festgeklemmt und mit seiner Mitte nur wenig vom Pole entfernt ist. Der zum Festklemmen des Bleches benützte und angeschraubte Holzdeckel hat in der Mitte eine Öffnung, durch welche man gegen das Blech sprechen kann.


Fig. 207.

Dies Sprechtelephon ist mit einem ganz gleich konstruierten Hörtelephon verbunden durch isolierte (Telegraphen-)Leitungen, von denen eine durch die Erde ersetzt werden kann. Spricht nun die eine Person gegen die Öffnung des Telephons, so geschieht folgendes.

Die menschliche Sprache besteht aus Schwingungen der Luft, die nach Geschwindigkeit und Art verschieden sind. Diese Luftschwingungen treffen auf das Blech und versetzen es in eben solche Schwingungen; dadurch kommt das Blech dem Magnetpol bald näher, bald ferner. Jede Annäherung hat aber Verstärkung des Magnetes, jede Entfernung Schwächung desselben zur Folge. Verstärken und Schwächen des Magnetes bringt aber in den Drahtwindungen der Spule Induktionsströme hervor, Wechselströme, die nach Anzahl und Stärke den Luftschwingungen entsprechen. Dies geschieht im Sprechtelephon.

Diese Ströme kommen nun durch die Leitung zum Hörtelephon, durchlaufen die Spule und machen dadurch den Magnet bald stärker, bald schwächer magnetisch, da sie ja Wechselströme sind; deshalb zieht der Magnet das Eisenblech bald stärker, bald schwächer an, das Eisenblech macht deshalb Schwingungen, die nach Anzahl und Art denen des Sprechtelephons entsprechen. Diese Schwingungen teilen sich der Luft mit und erzeugen den Ton, den man, wenn man das Telephon mit der Öffnung ans Ohr hält, hören kann.

Das Telephon überträgt die Töne so deutlich, daß man die gesprochenen Worte verstehen kann. Allerdings sind die Töne im Hörtelephon so schwach, daß die Umgebung vollständig ruhig sein muß, wenn man das Gesprochene verstehen soll. Man versuchte diese Telephone vielfach zu verbessern durch Anwendung größerer Bleche, Anbringung zweier statt eines Magnetpoles, und hat da-

durch wirklich kräftigeren Laut erlangt, doch wurde an Deutlichkeit verloren; insbesondere bekommt der Ton einen fremdartigen Klang, er klingt hohl oder blechern.

162. Mikrophon.

Das Mikrophon, erfunden von Hughes, hat folgende Einrichtung: von einem Resonanzkästchen geht ein Brettchen nach aufwärts; auf ihm sind zwei Kohlenblöcke festgeschraubt und mit Klemmschrauben versehen; beide Kohlenblöcke haben kleine Vertiefungen. Zwischen ihnen befindet sich ein Kohlenstift, beiderseits zugespitzt, unten in der Vertiefung des unteren Blockes stehend, oben in die Vertiefung des oberen hineinragend, so daß er sich leicht an den oberen Block anlehnt. Man leitet den Strom von einem Elemente zum unteren Kohlenblocke; dann geht er durch den Kohlenstift in den oberen Block; von dort leitet man ihn zu einem Telephon und von da zum Elemente zurück; dadurch ist der Strom geschlossen, verläuft in stets gleicher Stärke und verursacht kein Geräusch im Telephon.

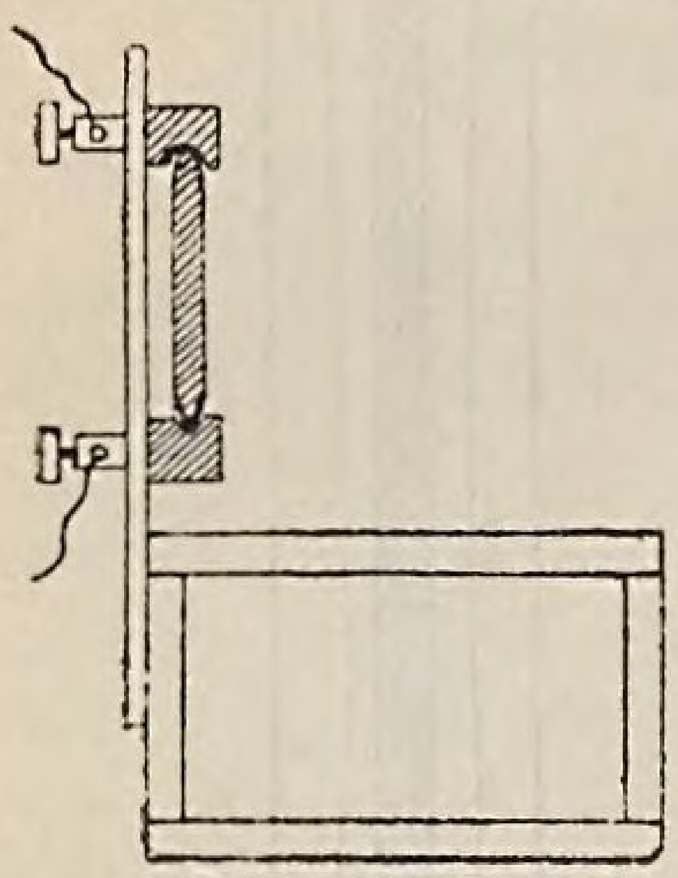


Fig. 208.

Wenn man aber am Mikrophone ein kleines Geräusch oder einen schwachen Ton erzeugt, indem man die Taschenuhr auf den Resonanzkasten legt, oder Sandkörner darauf fallen läßt, oder einen wie eine Saite darauf gespannten Faden anzupft u. s. w., so kommt auch das Brettchen und damit der obere Kohlenblock in Schwingungen. Dieser drückt deshalb gegen den berührenden Kohlenstift bald stärker, bald schwächer; dadurch wird der Widerstand an der Berührungsstelle bald schwächer, bald stärker, und dadurch der Strom des Elementes bald stärker, bald schwächer, entsprechend den Schwingungen des erzeugten Geräusches. Das Stärker- und Schwächerwerden des Stromes erzeugt aber im Telephone einen Ton, der ebenfalls dem ursprünglichen Geräusch entspricht, und laut genug ist, so daß man ihn deutlich hören kann. Der Apparat heißt Mikrophon, weil man damit einen schwachen Ton noch hören kann.

163. Mikrophontransmitter.

Eine Abänderung des Mikrophons wird in Verbindung mit einem Telephone benützt zum Telephonieren (Fernsprechen) und zwar als Zeichengeber und heißt Transmitter oder Mikrophontransmitter. Er hat im wesentlichen folgende Einrichtung: Der Deckel eines runden Kästchens besteht aus einer dünnen elastischen Platte (M), z. B. dünn geschabtem Holze oder Glimmer; vor derselben ist zu deren Schutz eine harte Platte P angebracht; diese hat in der Mitte ein Loch, in welcher ein Schalltrichter

mündet, der den Ton auffängt und gegen die Mitte der elastischen Membran leitet. Das Kästchen wird so befestigt, daß die Membran vertikal steht. Auf der hinteren Seite der Membran ist in deren Mitte ein Kohlenblock A befestigt. Dieser wird berührt von einem gut abpolierten Graphitblock H, der mittels einer Messingfassung drehbar so aufgehängt ist, daß er sich nur schwach an den Kohlenblock anlehnt.

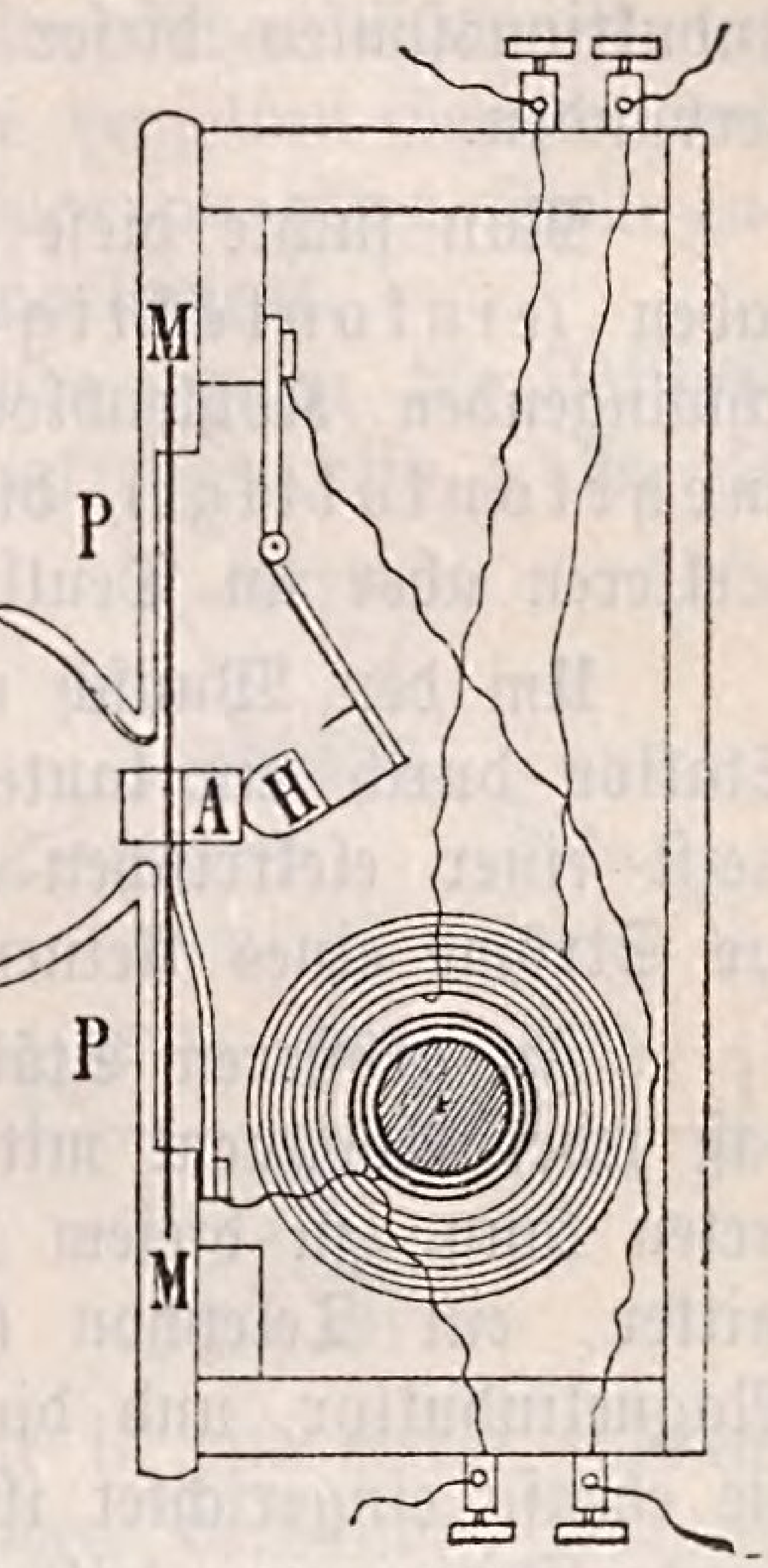


Fig. 209.

Leitet man den Strom eines Elementes vom einen Pole in den Kohlenblock, so geht er durch die Berührungsstelle in den Graphitblock, und leitet man ihn von da zum andern Pole des Elementes, so ist der Strom geschlossen. Wenn man nun gegen den Schalltrichter spricht, so kommt die Membran in Schwingungen, es ändert sich wie beim Mikrophon der Berührungswiderstand zwischen Kohlen- und Graphitblock und dadurch die Stromstärke. Würde man in diesen Stromkreis ein Telephon einschalten, so könnte man aus demselben die Töne wieder hören; ist aber dabei das Hörtelephon weit entfernt, also die Leitung lang, und der Widerstand groß, so bewirken die Änderungen des Berührungswiderstandes nur sehr geringe Änderungen der Stromstärke, so daß der im Telephon erzeugte Ton nur ungemein schwach wäre.

Man leitet deshalb den Strom des Elementes nicht durch die „Linie" ins Telephon, sondern nur durch die primäre Rolle eines kleinen Induktionsapparates. Im Innern des Mikrophonkästchens ist ein Induktionsapparat angebracht, bestehend aus dem Eisenkern, einer primären Rolle von wenig Windungen und einer Induktionsrolle von sehr vielen Windungen. Der Strom des Elementes geht durch den Kohlenkontakt und die primäre Rolle, hat also geringen Widerstand, so daß Änderungen des Berührungswiderstandes die Stromstärke wesentlich ändern. Diese Änderungen der Stromstärke erzeugen in der Induktionsspule entsprechende Induktionsströme, welche wegen der großen Anzahl der Windungen eine hohe elektromotorische Kraft haben und damit bedeutenden Widerstand überwinden können. Diese Induktionsströme leitet man durch die „Linie" zum weit entfernten Telephon, dann kann man in demselben die erzeugten Töne hören.

Der Apparat wirkt vorzüglich: Die Töne sind stark genug, so daß man sie, auch wenn die Umgebung nicht vollständig ruhig ist, ohne Mühe gut vernehmen und das Gesprochene deutlich verstehen kann; selbst bei großen Entfernungen bleiben die Töne noch

deutlich vernehmbar. Will man auch gegensprechen, so muß jede Station einen Transmitter und ein Telephon besitzen und alle 4 Induktionsspulen dieser Apparate sind zu einer einzigen Leitung verbunden.

Man suchte diese Transmitter, die nur eine Kohlenberührung haben (einkontaktige), dadurch zu verbessern, daß man den schwingenden Kohlenblock an mehrere Kohlenstifte berühren läßt (mehrkontaktige), die übertragenen Töne werden dadurch lauter, verlieren aber an Deutlichkeit.

Um den Wunsch nach telephonischer Mitteilung an die andere Station durch ein lautes Zeichen zu übermitteln, bedient man sich meist einer elektrischen Klingel, die man in Thätigkeit setzt durch die Ströme eines kleinen Magnetinduktionsapparates.

In größeren Städten richtet man Telephonanlagen derart ein, daß jeder Abonnent mit jedem andern in telephonische Verbindung treten kann; zu diesem Zweck bekommt jeder Abonnent einen Transmitter, ein Telephon (sogar deren 2), eine Klingel und einen Magnetinduktor, und die Leitung führt von ihm zur Centralstation, die ebenso eingerichtet ist. Will A mit B sprechen, so ruft A die Centralstation an, teilt dem dort befindlichen Beamten seinen Wunsch mit, der Beamte ruft B an, und wenn B zu sprechen ist, bringt der Beamte die Leitung des A und des B durch den „Centralumschalter“ in leitende Verbindung, so daß A und B nun direkt korrespondieren können. Schließlich wird der Beamte wieder angerufen, worauf er die Verbindung des A und B wieder aufhebt. Man hat auch schon Städte von über 100 *km* Entfernung telephonisch verbunden.

164. Thermoelektrizität.

Stets wenn zwei verschiedene Metalle an einer Stelle zusammengelötet und an den beiden anderen Enden durch einen Leiter verbunden werden, entsteht ein Strom, wenn man die Lötstelle erwärmt.

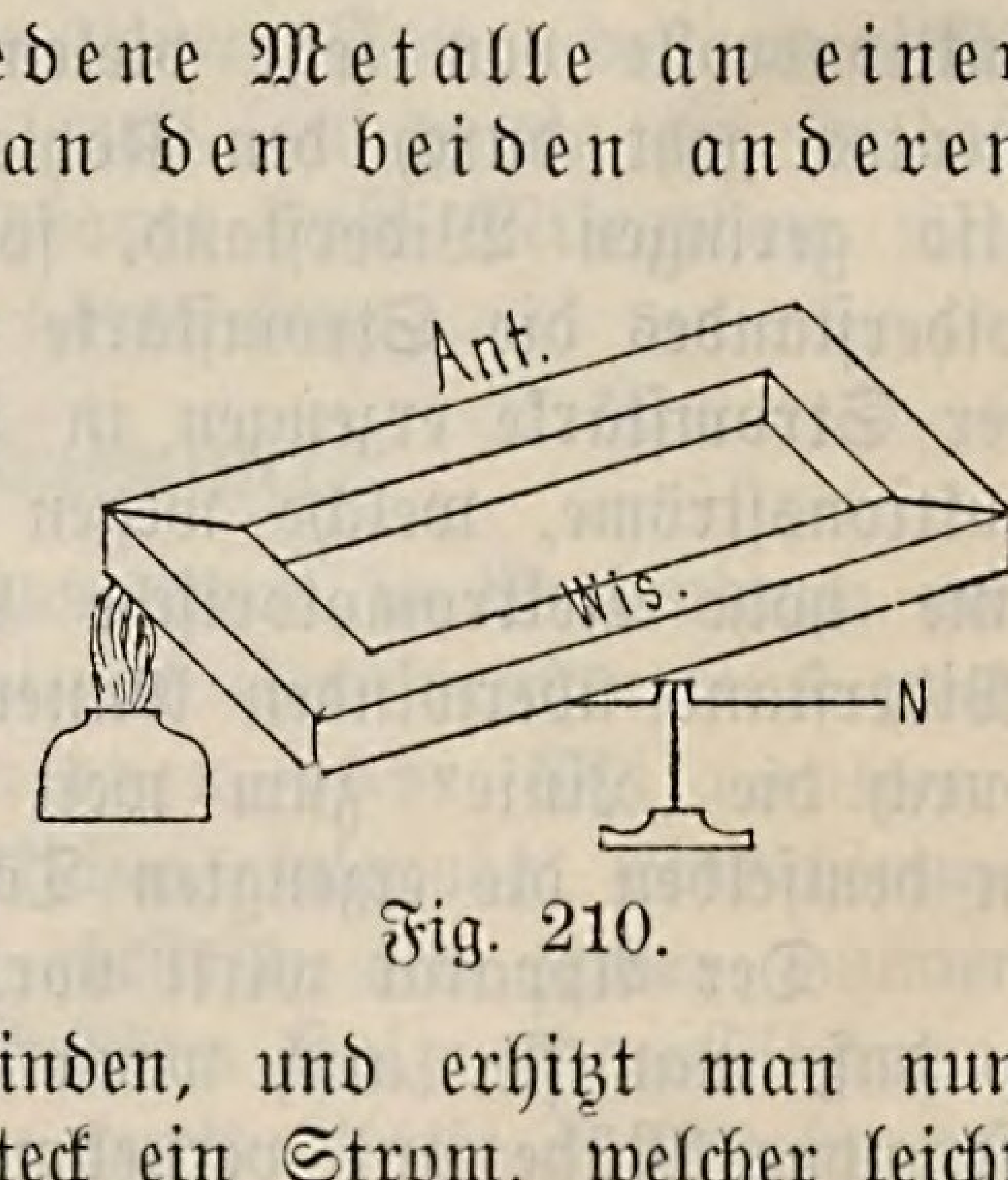


Fig. 210.

Macht man einen rechteckigen Rahmen aus Wismut und Antimon, so daß zwei zusammenstoßende Seiten aus Wismut, die beiden anderen aus Antimon bestehen und an gegenüberliegenden Ecken sich die Lötstellen befinden, und erhitzt man nun eine Lötstelle, so entsteht in dem Rechteck ein Strom, welcher leicht eine Magnetnadel ablenkt.

Die durch Wärme hervorgebrachte Elektrizität heißt Thermoelektrizität, der Strom ein Thermostrom (Seebeck 1821). Die Thermoströme unterscheiden sich von den galvanischen Strömen nur durch die Entstehungsursache; sonst folgen sie denselben Gesetzen und bringen dieselben Wirkungen hervor. Ein Paar an einer Stelle zusammengelöteter Metallstäbe heißt ein **Thermoelement.**

Ein Thermostrom kommt nur zu stande, wenn die Lötstelle wärmer ist, als die anderen Teile des Stromkreises, also z. B. als die andere Lötstelle, wenn also von der warmen Lötstelle nach beiden Seiten hin die Temperatur abnimmt. Ist dies der Fall, so entsteht eine elektromotorische Kraft, deren Größe abhängt von der Temperaturdifferenz der beiden Lötstellen und derselben nahezu proportional ist.

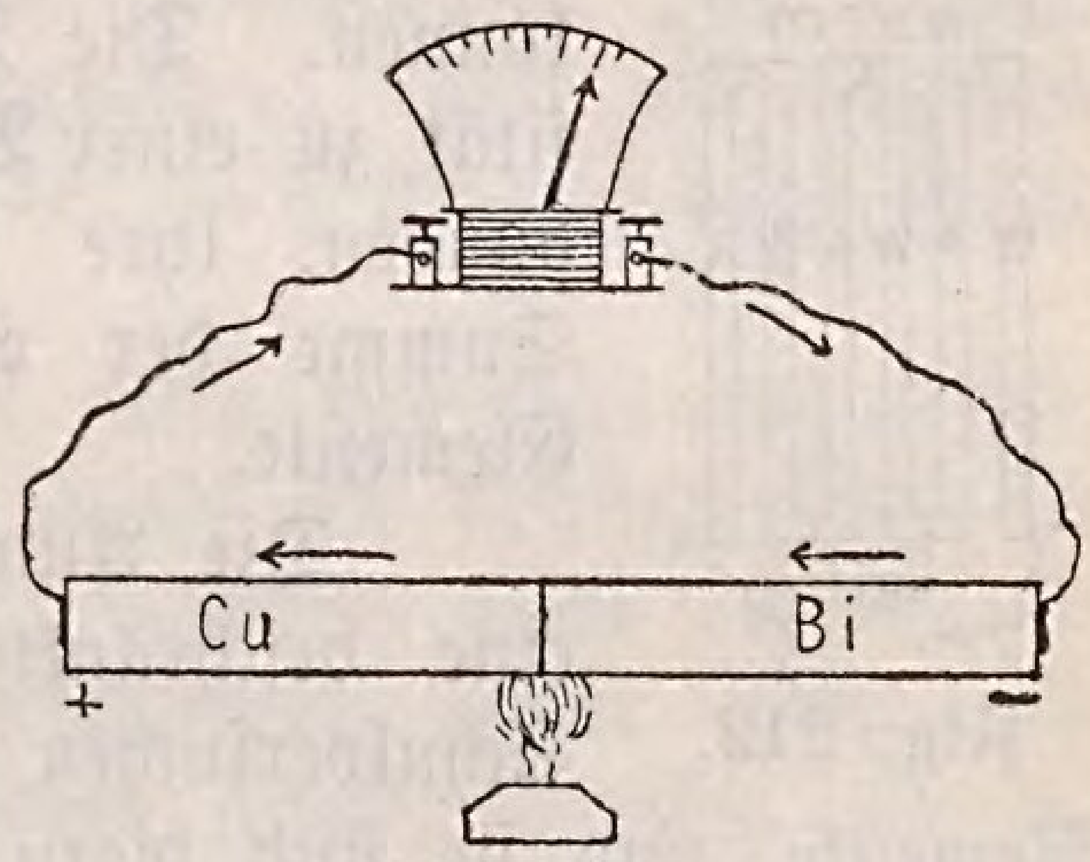


Fig. 211.

Die elektromoterische Kraft ist aber nur abhängig von der Natur der verwendeten Metalle. Man kann alle Metalle in eine Reihe ordnen, so daß jedes Metall mit einem der folgenden verbunden negativ elektrisch wird. Diese thermoelektrische Reihe ist nach Bequerel —Wismut, Nickel, Platin, Kobalt, Mangan, Silber, Zinn, Blei, Messing, Kupfer, Gold, Zink, Eisen, Antimon +.

Wenn man also etwas Wismut mit Kupfer zusammenlötet und die Lötstelle erwärmt, so wird Wismut negativ, Kupfer positiv elektrisch, und der positive Strom läuft von der erwärmten Lötstelle aus durch das Kupfer über die kalte Lötstelle zum Wismut. Sind die beiden kalten Enden nicht mit einander verbunden, so daß an ihnen die Elektrizitäten frei vorhanden sind, so kann man diese Enden auch die Pole des Thermoelements nennen; das freie kalte Wismutende ist also der negative, das freie kalte Kupferende der positive Pol des Elementes. Verbindet man beide Pole leitend, so entsteht der Thermostrom.

Die elektromotorische Kraft der Thermoelemente ist im allgemeinen nicht besonders groß; so kann ein Element aus Wismut und Antimon etwa $^1/_{10}$ Volt haben. Ein Element aus Kupfer und Eisen hat, wenn es an der kalten Lötstelle 0, an der warmen 100° hat, nur eine elektromotorische Kraft von 0,0011 Volt.

Der Vorteil der Thermoelemente liegt aber darin, daß sie sehr einfach konstruiert sind und daß ihr innerer Widerstand meist sehr klein ist; z. B. wenn in dem Wismut-Antimonelemente jedes Metall etwa 2 *cm* lang ist und $^1/_{10}$ *qcm* Querschnitt hat, so ist sein innerer Widerstand = 0,0034 Ohm. Ist demnach der äußere Widerstand auch klein, so ist mit solchen Elementen ein verhältnismäßig starker Strom zu erzielen.

Man kann auch mehrere Thermoelemente zu einer Batterie vereinigen: man verbindet (verlötet) dann das freie Antimonende des ersten mit dem freien Wismutende des zweiten Elementes und so fort; man bringt dabei die Stäbe in solche Lage, daß abwechselnd die Lötstellen nach der einen und nach der anderen Seite schauen, so daß die nach der einen Seite schauenden Lötstellen von einer gemeinsamen Wärmequelle erwärmt, die nach der andern Seite schauenden Lötstellen alle zugleich abgekühlt werden können. Die Thermoelemente sind somit auf Intensität zu einer Batterie (Thermosäule, Thermokette) verbunden, ihre elektromotorische Kraft ist gleich der Summe der elektromotorischen Kräfte der einzelnen Elemente.

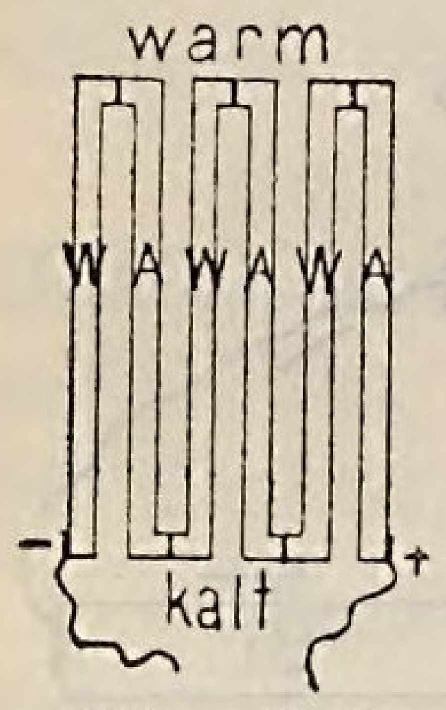


Fig. 212.

Die Anwendung der Thermoelektrizität ist noch eine beschränkte. Man benützt Thermobatterien zu Schulversuchen anstatt der gewöhnlichen galvanischen Elemente, und sie sind hiezu bequem, weil sie zur Herrichtung zum Gebrauch keine größere Mühe verursachen als das Anzünden einer Lampe.

Eine sehr wichtige Anwendung haben die Thermobatterien gefunden zur Messung sehr kleiner Temperaturdifferenzen. Man nimmt nämlich eine Thermosäule von etwa 20—40 Elementen, ordnet das eine System der Lötstellen so an, daß sie ein Quadrat erfüllen, und verbindet die Enden mit einem sehr empfindlichen Galvanometer (von geringem Widerstande). So lange beide Flächen, welche die Lötstellen enthalten, gleich warm sind, zeigt das Galvanometer keinen Ausschlag, sobald aber die eine Fläche nur etwas stärker erwärmt wird, entsteht ein Thermostrom, der einen Ausschlag hervorbringt. Man benützt sie, nach Melloni, besonders zu Untersuchungen über strahlende Wärme, indem man auf die eine Fläche die Wärmestrahlen auffallen läßt und die andere Fläche durch ein Gehäuse gegen Wärmestrahlen schützt. Mit solchen Apparaten kann sogar die von Fixsternen ausgestrahlte Wärme nachgewiesen werden.

Zur Messung sehr hoher Temperaturen (als Pyrometer) dient ein Thermoelement aus Platin einerseits und einer Legierung aus Platin und Rhodium (9:1) andrerseits. Die Lötstelle wird der Hitze ausgesetzt und der entstandene Thermostrom am Galvanometer gemessen.

Neunter Abschnitt.

Wellenlehre und Akustik.

165. Entstehung der Wellen.

Eine eigentümliche Art von Bewegung und Fortpflanzung derselben ist die wellenförmige Bewegung, welche wir zunächst betrachten an dem bekannten Beispiele einer Welle, die im Wasser entsteht, wenn man etwa einen Stein hineinwirft. Im ruhigen Wasser ist die Oberfläche eben und horizontal, und die einzelnen Wasserteilchen sind im Gleichgewichte, weil sie von allen Seiten gleich stark gedrückt werden.

Durch Hineinwerfen des Steines wird das Gleichgewicht gestört, denn der einfallende Stein schiebt die Wasserteilchen bei seite, so daß sie einen ringförmigen, erhöhten Wall um die getroffene Stelle bilden, und an der getroffenen Stelle selbst eine Vertiefung entsteht. Wegen des verschieden starken Druckes, der infolge der höheren und tieferen Lage der Wasserteilchen entsteht, ist das Gleichgewicht gestört; an der erhöhten Stelle gehen die Wasserteilchen nach abwärts und an der vertieften Stelle werden sie durch den Überdruck der höher liegenden Teile nach aufwärts gedrückt.

Diese beiden Bewegungen setzen sich aber nicht bloß so weit fort, bis die Wasserteilchen in der natürlichen Gleichgewichtslage, wie sie beim ruhenden Wasser vorhanden ist, angekommen sind, sondern dauern noch fort vermöge des Beharrungsvermögens, ebenso wie bei einem aufgehängten schwingenden Körper. Die an den erhöhten Stellen liegenden Wasserteilchen bewegen sich also nach abwärts nicht bloß bis zur natürlichen Gleichgewichtslage, sondern noch etwas unter dieselbe; ebenso werden die an den tieferen Stellen liegenden Teile nicht bloß bis zur natürlichen Gleichgewichtslage gehoben, sondern bewegen sich dann noch etwas über dieselbe hinaus.

Dadurch, daß die Wasserteilchen an den erhöhten Stellen herabsinken, drücken sie aber auf die benachbarten und heben dadurch diese nach aufwärts; während also der eine Wall nach abwärts sich bewegt und eine Vertiefung bildet, entsteht rings um ihn ein anderer, etwas weiterer, erhöhter Wall. Es hat sich somit das Gleichgewicht noch nicht hergestellt, denn es sind nun andere Wasserteile einerseits oberhalb, anderseits unterhalb der natürlichen Gleichgewichtslage; es entsteht daher derselbe Vorgang wieder, der Wall sinkt nach abwärts, die vertieften Teile werden nach abwärts gehoben, und rings um den äußeren herabsinkenden Wall entsteht ein neuer Wall und so geht es fort. Wir sehen so, daß im Wasser der ringförmige Wall sich immer weiter ausdehnt, daß neue ringförmige Erhebungen folgen, daß das einmal gestörte Gleichgewicht sich auf immer andere und andere Stellen überträgt. Bei zuneh-

mender Ausbreitung werden die Wälle immer niedriger, bis sie der Wahrnehung entgehen.

Eine solche Bewegung nennt man eine wellenförmige Bewegung, deren Art wir nun genauer betrachten.

166. Form der Wellen.

Die einzelnen Wasserteilchen, welche sich wellenförmig bewegen, machen auf- und abgehende Bewegungen oder Schwingungen. Wenn wir also sehen, daß die ringförmigen Wälle der im Wasser entstehenden Wellen sich nach auswärts weiter bewegen, so geschieht dies nicht dadurch, daß die in den Wellen enthaltene Wassermenge sich nach auswärts bewegt und so gleichsam über den ruhigen Wasserspiegel hingleitet, sondern nur dadurch, daß die Wasserteilchen abwärts und aufwärts sich bewegen; man sieht ja auch, wie kleine auf dem Wasser schwimmende Gegenstände von der Welle nicht nach auswärts fortgeschoben werden, sondern nur an der auf- und abwärts gehenden Bewegung teil nehmen.

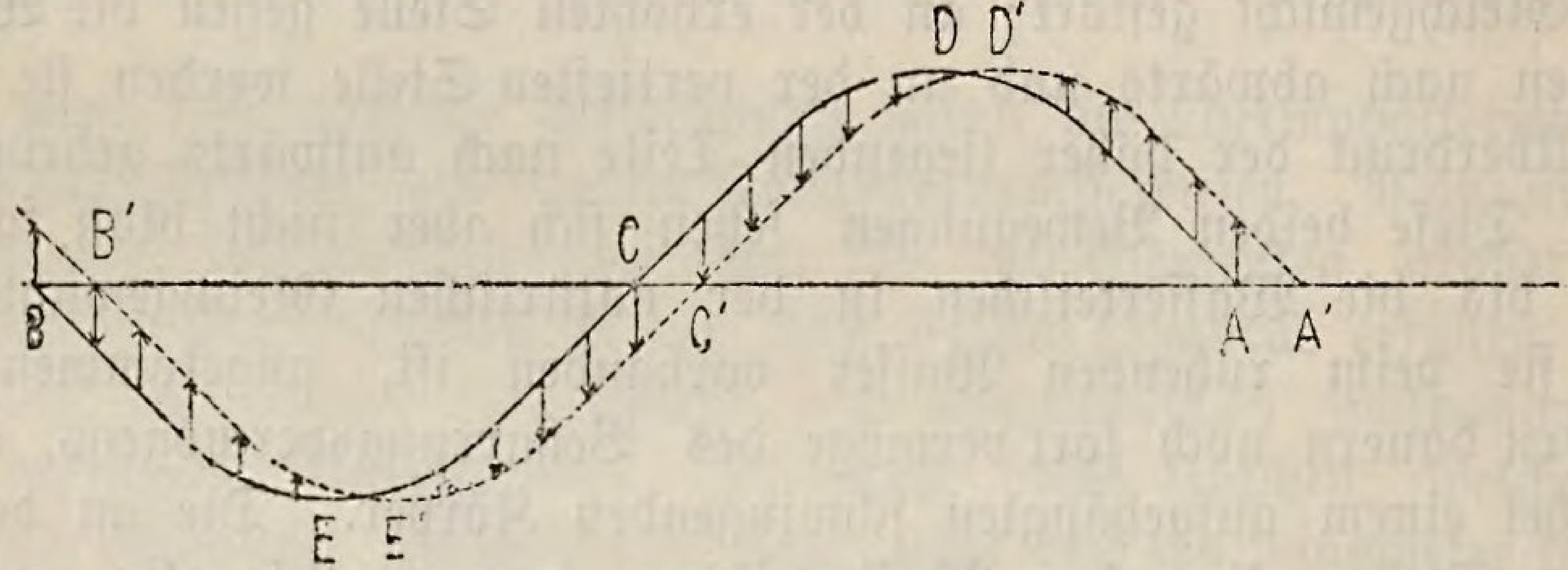


Fig. 213.

Gestalt der Oberfläche der Wasserwelle: derjenige Teil, in welchem die Wasserteilchen über der natürlichen Gleichgewichtslage sich befinden, heißt ein Wellenberg, derjenige Teil, in welchem die Wasserteilchen sich unterhalb der Gleichgewichtslage befinden, ein Wellenthal; ein Berg und ein benachbartes Thal bilden eine Welle und ihre Länge heißt eine Wellenlänge.

Die Form einer einfachen Welle ist aus Fig. 213 ersichtlich.

Die Bewegung der einzelnen Teile der Welle ist dabei folgende: Wenn die Welle sich in der Richtung von B nach A fortpflanzt, so sind die Punkte E und D momentan in Ruhe, die Punkte C, B und A haben eben ihre größte Geschwindigkeit, A und B nach aufwärts und C nach abwärts, die dazwischen liegenden Punkte haben um so geringere Geschwindigkeiten, je näher sie an E resp. D liegen und zwar bewegen sich die Punkte zwischen B und E nach aufwärts, zwischen E und D nach abwärts und zwischen D und A nach aufwärts, und auch die zunächst vor A liegenden Teile werden, wenn sie noch ruhig sind, in die aufwärts gehende Bewegung ein-

gezogen. Lassen wir jedes Teilchen eine dieser Angabe entsprechende kleine Bewegung machen, so ist die neue Form der Welle B′ E′ C′ D′ A′. Es hat sich somit sowohl der Berg als das Thal in der Richtung der Fortpflanzung der Welle etwas vorwärts verschoben, denn es ist der Kamm des Berges von D nach D′ und der Grund des Thales von E nach E′ gerückt. Auf diese Weise rückt die Welle vorwärts oder pflanzt sich fort, während die Wasserteilchen bloß eine auf- und abwärtsgehende Bewegung machen.

In Fig. 214 ist angedeutet, wie sich eine in A ankommende Wellenbewegung nach rechts fortsetzt. Während in I. A sich zum Gipfel des Berges erhebt, erheben sich nach und nach die vor ihm liegenden Teile bis B und bilden einen halben Berg, die erste Viertelwelle. Während in II. von B aus dieselbe Bewegung sich nach C fortpflanzt, steigen nach und nach die zwischen A und B liegenden Teile bis zum Kamm des Berges, und sinken dann entsprechend herab, so daß der Kamm von A nach B fortgerückt ist. Während auf diese Weise in III der Berg AC fortrückt, sinken die Teile zwischen A und B nach abwärts, so daß die erste Thalhälfte entsteht, und während in IV dieser Teil sich ebenso fortpflanzt, rückt zwischen A und B der Grund des Thales von A nach B fort, indem ein Teilchen nach dem andern zum Grund des Thales hinab rückt und dann wieder entsprechend nach aufwärts geht.

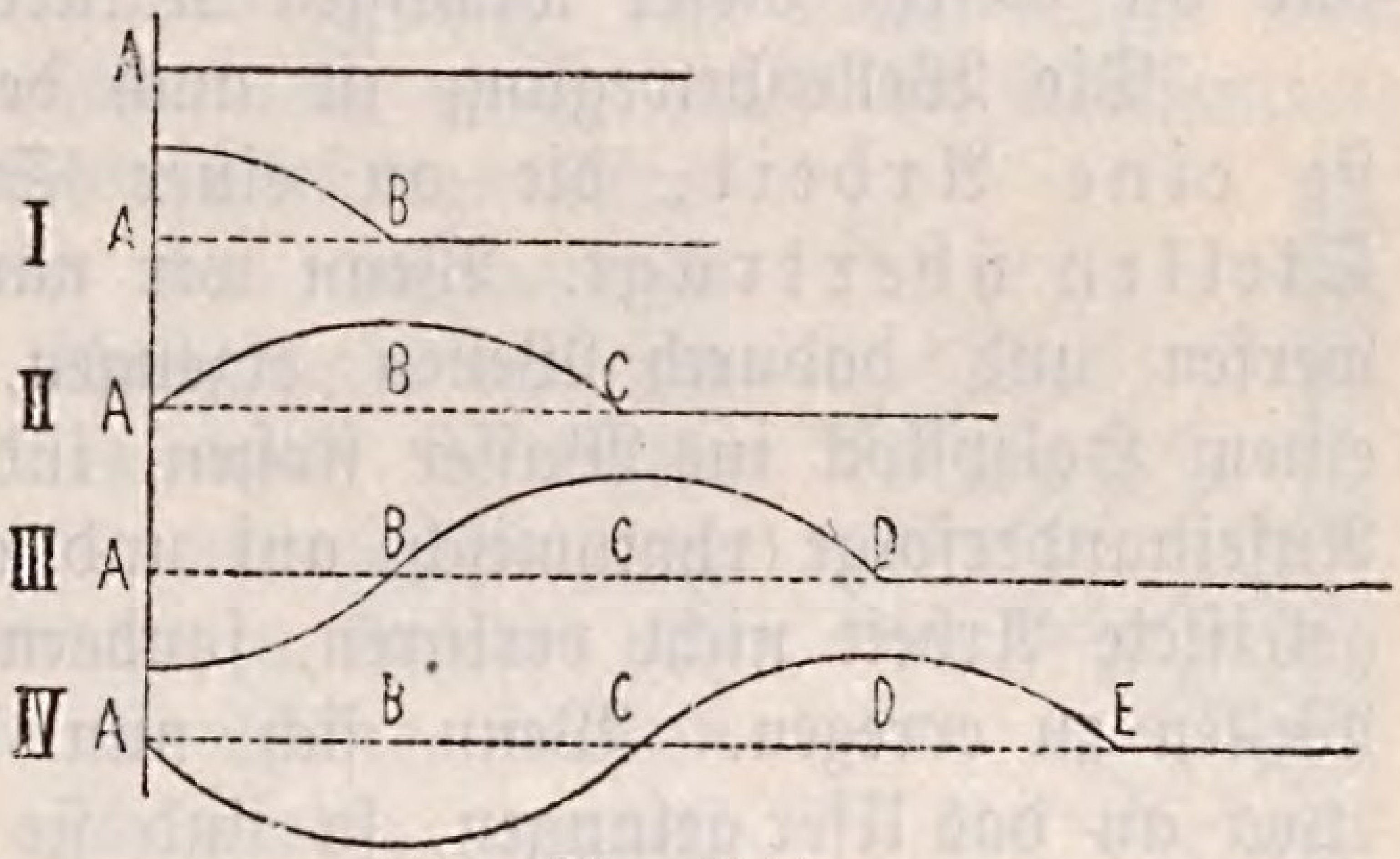


Fig. 214.

Während dieser Zeit hat einerseits der Punkt A eine vollständige Schwingung nach auf- und abwärts gemacht, andererseits die Welle sich gerade um ihre Länge AE fortpflanzt: **während der Schwingungsdauer eines Teilchens pflanzt sich die Welle um ihre eigene Länge fort.**

167. Bedeutung der Wellen.

Die eben betrachtete Wellenbewegung ist in vielfacher Hinsicht von Wichtigkeit. Zunächst ist die eigentümliche Art der Fortpflanzung der Bewegung nochmals hervorzuheben, eigentümlich deshalb, weil diejenige Masse, welche die Bewegung zuerst macht und dadurch die Welle verursacht, nicht eine fortschreitende, sondern nur eine hin- und hergehende, oscillierende, schwingende Bewegung macht und, wenn die Ursache der Bewegung aufhört, selbst wieder in Ruhe bleibt und sich dann an derselben Stelle befindet, an welcher sie sich zuerst befand; ferner weil diese Bewegung nicht auf

die erste Masse beschränkt bleibt, sondern sich auf alle folgenden Massenteile überträgt derart, daß jedes folgende Wasserteilchen dieselbe Bewegung in etwas späterer Zeit macht als das vorhergehende, und schließlich, weil in dieser Art sich die Bewegung fortpflanzt, ohne daß die Masse selbst fortrückt. Wellenbewegung ist nicht ein Fortschreiten einer bewegten Masse, sondern eine sich durch eine Masse fortsetzende schwingende Bewegung einzelner Massenteile.

Die wellenförmige Bewegung ist deshalb von besonderer Wichtigkeit, weil sowohl der Schall als auch die Licht- und Wärmestrahlen wellenförmige Bewegungen sind, und weil man nur durch das Verständnis der Wellenbewegung einen Einblick in den Verlauf und die Gesetze dieser wichtigen Naturerscheinungen bekommt.

Die Wellenbewegung ist auch deshalb von Wichtigkeit, weil sie eine Arbeit, die an einer Stelle geschieht, an andere Stellen überträgt. Wenn wir nämlich einen Stein ins Wasser werfen und dadurch Wellen erzeugen, oder wenn wir etwa mit einem Holzpflock ins Wasser stoßen, indem wir ihn in regelmäßiger Aufeinanderfolge (rhythmisch) auf und ab bewegen, so ist die hiebei geleistete Arbeit nicht verloren, sondern dazu verwendet worden, um Wellen zu erregen. Wenn sich nun die Wellen fortpflanzen und etwa an das Ufer gelangen, so sind sie dort imstande, selbst wieder Arbeit zu leisten, wir sehen ja, wie die ans Ufer anschlagenden Meereswellen die Steine hin- und herrollen, wie sie ein Schiff, ein Floß heben und senken, und wenn wir uns denken, daß auf diesem Flosse eine Stange befestigt sei, die durch einen Hebel etwa mit einer Pumpe in Verbindung steht, so erkennen wir leicht, daß durch die Wellenbewegung die Pumpe getrieben, Wasser gehoben, also Arbeit geleistet wird. Wir erkennen somit, daß die Arbeit, die aufgewendet wurde, um die Wellenbewegung hervorzurufen, sich durch die Wellenbewegung nach anderen Orten fortpflanzt und dort wieder als Arbeit zum Vorschein kommen kann dadurch, daß die Wellenbewegung verschwindet. Die ungeheuere Menge Wärme, die wir von der Sonne erhalten, haben wir anzusehen, als das Resultat einer Wellenbewegung, welche von der Sonne ausgeht, sich bis zur Erde fortpflanzt, dort auf Stoffe trifft, in welchen sie sich nicht fortpflanzen kann, deshalb als Wellenbewegung verschwindet und dadurch die in ihr befindliche Arbeit leistet, welche als Erwärmung des Körpers zum Vorschein kommt.

Wenn wir einerseits erkennen, daß in der Welle eine gewisse Arbeitsfähigkeit enthalten ist, andererseits sehen, daß die Welle sich nach allen Seiten ausbreitet, also immer größere Mengen Wasser in Bewegung setzt, so folgt, daß die Größe oder Stärke der Bewegung der einzelnen Teile immer kleiner werden muß. Ist dagegen das Wasser in einer Rinne oder einem Kanale von stets gleicher Breite eingeschlossen, so behält die Wellenbewegung beim

Fortschreiten stets dieselbe Stärke, die Welle behält stets die gleiche Höhe und überträgt so die in ihr liegende Arbeit ungeschwächt auf eine beliebig große Entfernung, vorausgesetzt, daß ihr nicht durch andere Ursachen (Reibung) unterwegs etwas von ihrer Arbeitsfähigkeit genommen wird. Man findet thatsächlich, daß in einem Kanale mit glatten Wänden eine Welle sich verhältnismäßig weit fortpflanzt, ohne viel von ihrer Höhe zu verlieren. Verbreitert sich der Kanal, so wird die Höhe der Welle geringer; verengt sich der Kanal, so wird die Höhe der Welle größer.

168. Reflexion der Wellen.

Wenn die Welle an einen Stoff trifft, der seiner Natur nach die Wellenbewegung nicht machen kann, z. B. wenn die Wasserwelle an das Ufer trifft, so wird die Welle zurückgeworfen oder reflektiert, wenn der begrenzende Stoff glatt ist. Trifft die Wasserwelle an eine gerade Wand oder Mauer, so wird sie regelmäßig zurückgeworfen, und man unterscheidet hiebei leicht zweierlei Fälle: kommt ein System paralleler Wellen (Fig. 215) an die Wand, so sind die zurückgeworfenen Wellen auch wieder parallel, in der Fortpflanzungsrichtung aber geändert, so daß der Winkel, unter welchem die Welle die Mauer trifft, gleich ist dem Winkel, unter welchem die Welle die Mauer verläßt. Wenn eine von einem Punkte A ausgehende Welle (oder ein Wellensystem) Fig. 216 eine gerade Wand trifft, so wird sie so reflektiert, daß es aussieht, als wäre sie von einem hinter der Wand liegenden Punkte A′ hergekommen, der ebensoweit senkrecht hinter der Wand liegt, als A vor der Wand liegt.

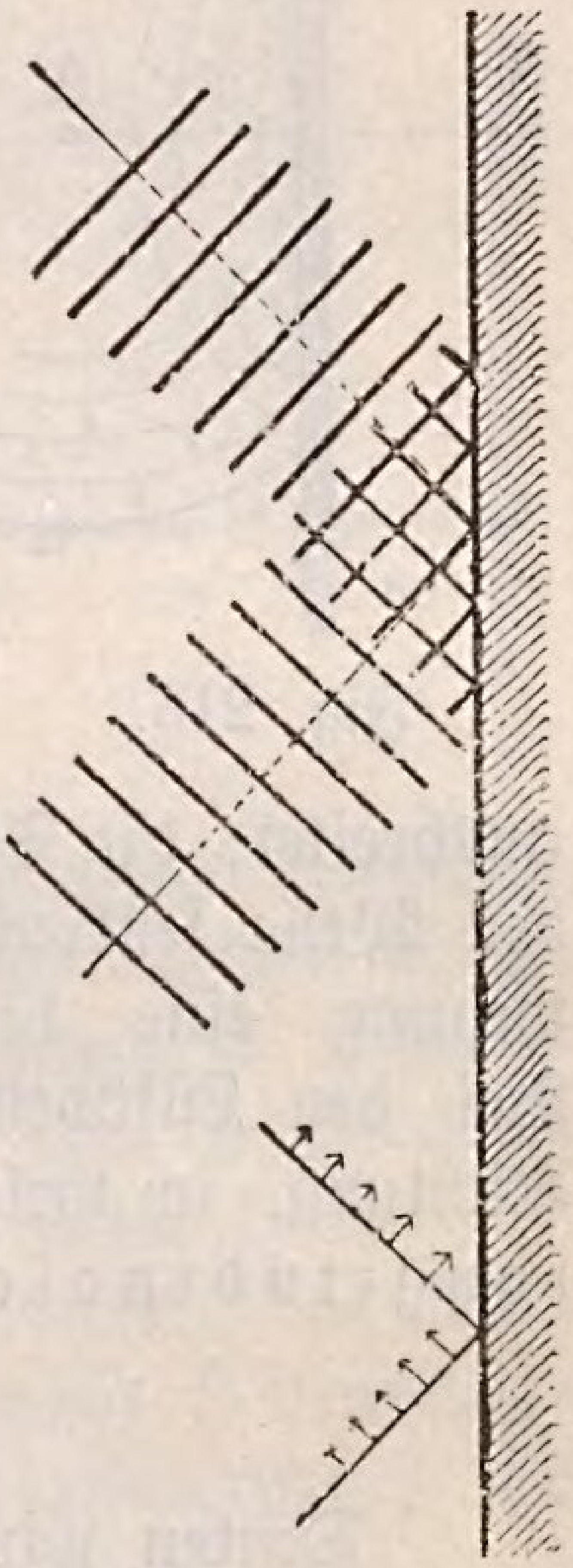


Fig. 215.

169. Entstehung und Wesen des Schalles.

Ein Schall entsteht, wenn ein Körper eine sehr rasche hin- und hergehende Bewegung macht; wenn sich diese Schwingungen durch die Luft bis zu unserem Ohre fortpflanzt, so hören wir den Schall.

Die Fortpflanzung des Schalles in der Luft geschieht durch eine wellenförmige Bewegung der Luft, und gerade diese Wellenbewegung der Luft (oder eines anderen Stoffes) nennen wir Schall oder Ton, während wir den schwingenden Körper, welcher die Bewegung verursacht, den schallgebenden oder tönenden Körper nennen.

Die wellenförmige Bewegung der Luft unterscheidet sich wesentlich von den schon betrachteten Wasserwellen, und zwar sowohl durch

die Kraft, welche infolge des gestörten Gleichgewichtes zum Vorschein kommt, als auch durch die Schwingungsrichtung der sich bewegenden Teilchen.

Bei den Wasserwellen ist die Schwerkraft diejenige Kraft, welche einen verschieden starken Druck der Wassermassen verursacht und so die Ursache des gestörten Gleichgewichtes ist. Bei einem tönenden Körper, z. B. einer Glocke, schiebt die vorwärtsgehende Glockenwand die Luft vor sich her, bewirkt also eine Verdichtung und damit eine Drucksteigerung der Luft; die zurückgehende Glockenwand hinterläßt einen luftleeren (oder wegen des Nachströmens der Luft nun verdünnten) Raum und bewirkt so eine Druckverminderung. Diese beiden Druckänderungen bedingen aber eine Störung im Gleichgewichtszustande der Luft, der ja nur dann vorhanden ist, wenn der Druck an allen Stellen derselbe ist. Die Folge dieser Gleichgewichtsstörung ist dann eine Bewegung und Fortpflanzung der Bewegung, die sich als Luftwelle darstellt.

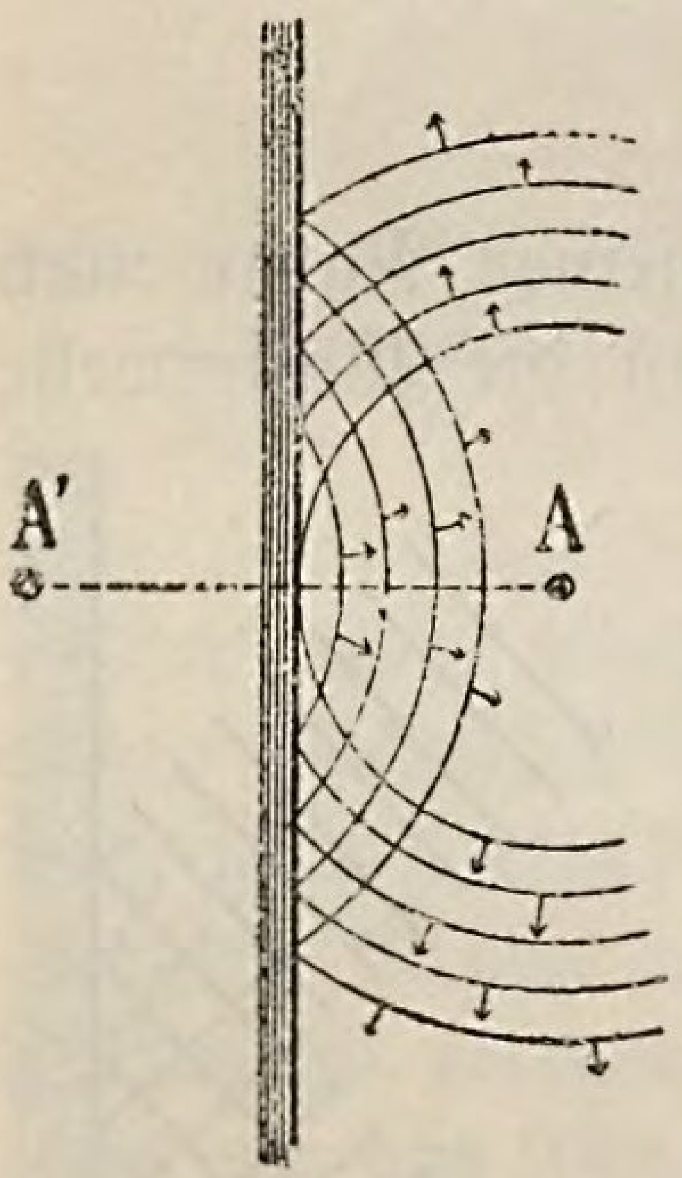


Fig. 216.

Bei den Wasserwellen bewegen sich die Wasserteilchen in vertikaler Richtung auf und ab, während die Welle sich in horizontaler Richtung ausbreitet; die Teilchen schwingen in einer zur Fortpflanzungsrichtung der Welle senkrechten Richtung, und man nennt eine derartige Bewegung eine transversale Schwingung (Querschwingung.) Bei den Luftwellen schwingen die Luftteilchen aber gerade in der Richtung, in welcher sich die Bewegung fortpflanzt, sie machen eine longitudinale Schwingung (Längsschwingung).

170. Form der Schallwellen.

Denken wir uns der Einfachheit halber die Luft in eine (sehr lange) Röhre eingeschlossen und am Anfange derselben einen schwingenden, tongebenden Körper, der die benachbarten Luftteilchen vorwärts schiebt und ihnen dann wieder Platz macht zum Zurückfließen. Durch das Vorwärtsschieben entsteht ein luftverdichteter Raum mit Drucksteigerung und die Folge ist, daß diese Luftteilchen auf die benachbarten drücken, auch sie vorwärts schieben und so die Drucksteigerung auch an den folgenden Stellen hervorrufen. Beim Zurückgehen des schwingenden Körpers werden die Luftteilchen in den entstehenden Raum zurückkehren und dadurch eine Luftverdünnung mit Druckverminderung hervorbringen, so daß auch die weiter vorwärts liegenden Luftteilchen in den luftverdünnten Raum zurückkehren, und sich auch die Luftverdünnung nach den folgenden Stellen fortpflanzt. Die Luftteilchen machen eine vor- und rückwärtsgehende Bewegung und pflanzen so die Luftver-

dichtung und Verdünnung immer weiter fort. Der Teil, in welchem die Luft verdichtet ist, heißt ein Wellenberg und der Teil, in welchem sie verdünnt ist, ein Wellenthal: ein Berg und ein benachbartes Thal bilden zusammen eine Luftwelle, und ihre Länge heißt die Wellenlänge.

Ist zwischen B und C Fig. 217 ein Wellenthal und zwischen C und A ein Wellenberg, so ist in E die Luft am dünnsten, in D am dichtesten, in B, C und A hat sie die normale Dichte und Spannung. In B, C und A haben die Luftteilchen die größte Geschwindigkeit und zwar stets in der Richtung, daß sie von der Stelle des höheren Druckes auf die Stelle des niedrigeren Druckes

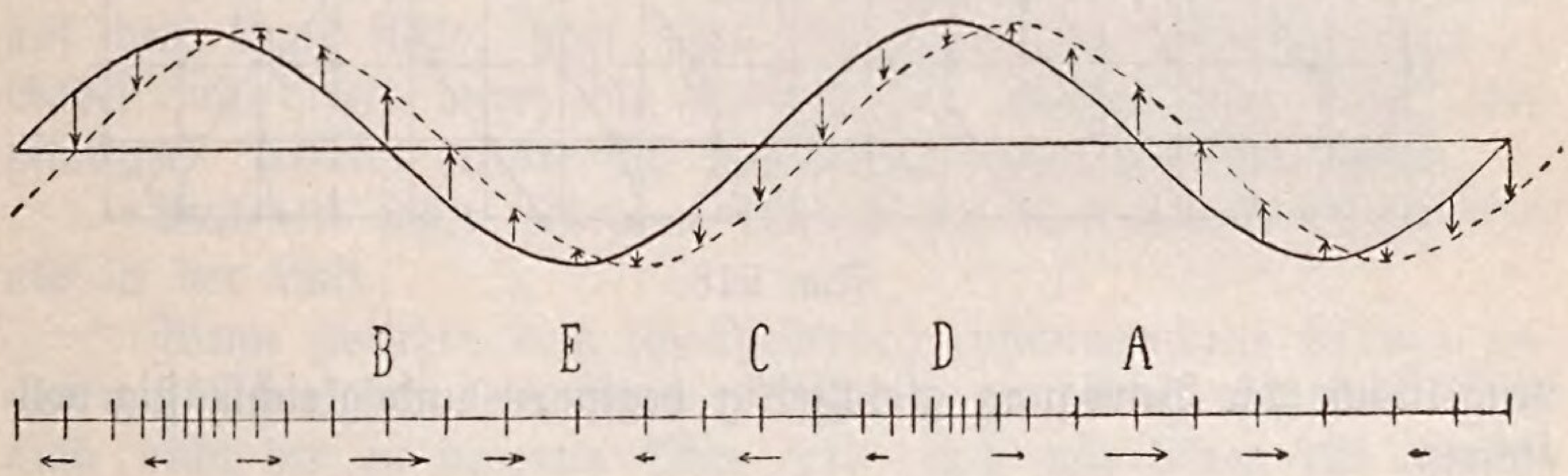


Fig. 217.

hinströmen; in E und D haben sie momentan gar keine Bewegung, und die dazwischen liegenden Teilchen bewegen sich in dem Sinne, welcher der Druckverteilung entspricht, um so schwächer, je näher sie an E resp. D liegen. Nachdem jedes Teilchen eine entsprechende kleine Bewegung gemacht hat, hat sich sowohl die Stelle D der Luftverdichtung als auch die Stelle E der Luftverdünnung um etwas nach rechts verschoben, die Welle hat sich nach rechts fortgepflanzt. Hierauf machen die Teilchen eine der neuen Druckverteilung entsprechende Bewegung und die Welle pflanzt sich dadurch fort.

In Figur 218 ist die Lage der Luftteilchen gezeichnet, wenn in A eine Welle (ein Berg) ankommt und sich nach rechts fortpflanzt; durch die verschiedenen Lagen eines und desselben Teilchens ist je eine Linie gezogen. Während der Punkt A eine ganze Schwingung macht, hat sich die Welle gerade um ihre eigene Länge fortgepflanzt.

Befindet sich der tönende Körper in freier Luft, nach allen Seiten von Luft umgeben, so pflanzt sich auch die wellenförmige Bewegung der Luft nach allen Seiten fort, weil einerseits die Luftteilchen nach allen Richtungen sich bewegen können und weil andererseits bei den entstehenden Druckänderungen die Wirkungen des Druckes auch nach allen Richtungen hin stattfinden.

Da sich bei gleichförmiger Beschaffenheit der Luft die Bewegung nach allen Richtungen gleich rasch fortpflanzen muß, so wird

sich nach einer gewissen Zeit die Bewegung fortgepflanzt haben bis zu allen Punkten einer Kugeloberfläche, in deren Mitte der tönende Körper sich befindet, und wird sich auf immer größer werdende Kugelflächen ausbreiten, so daß stets alle Punkte derselben

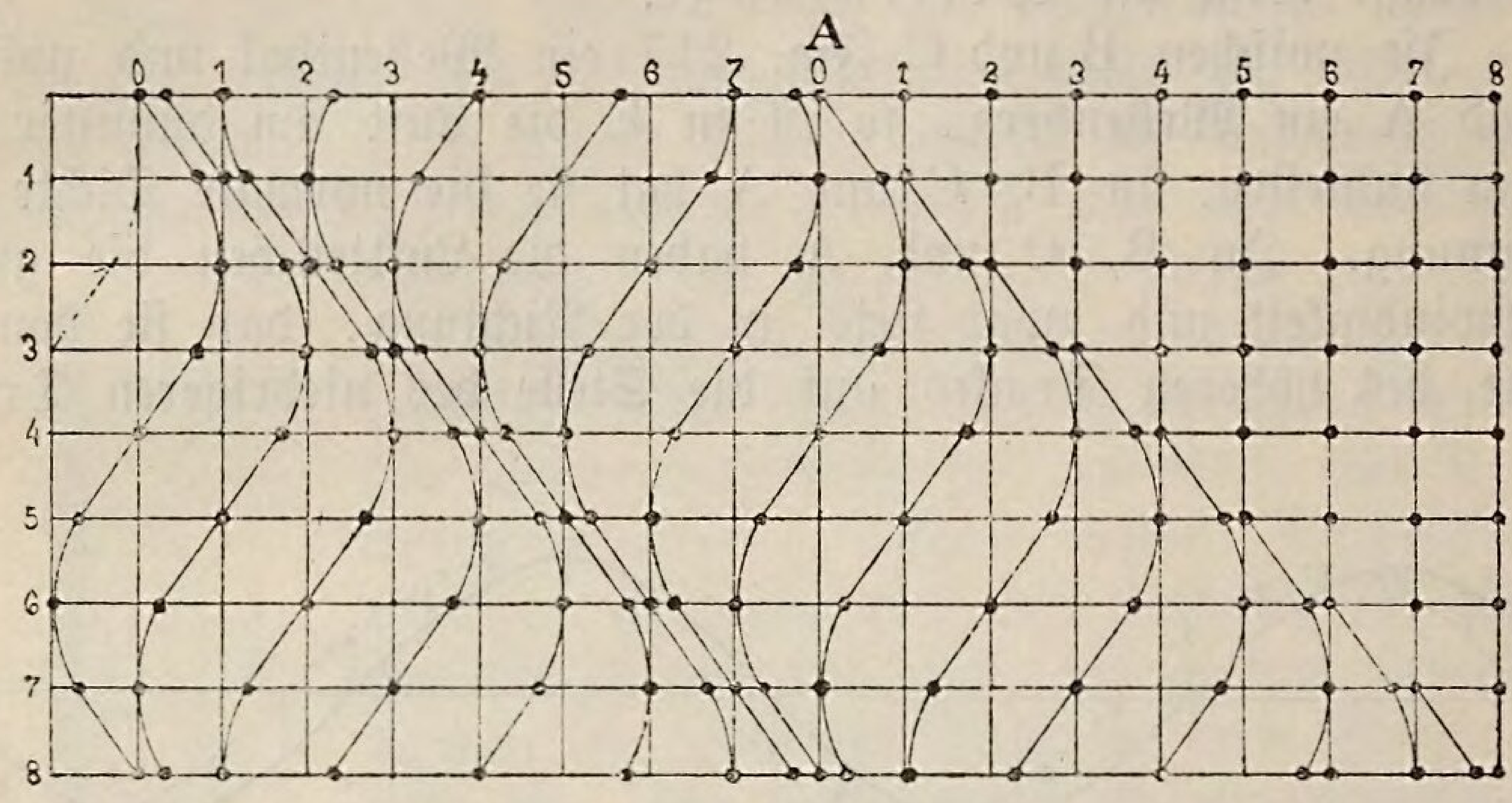


Fig. 218.

Kugelfläche die Bewegung gleichzeitig beginnen und gleichmäßig vollführen.

Eine vom schwingenden Körper ausgehende Gerade, längs deren die Schwingungen der Luftteilchen geschehen und längs deren sich der Schall fortpflanzt, wird wohl auch ein Schallstrahl genannt.

171. Geschwindigkeit und Stärke des Schalles.

Zur Fortpflanzung des Schalles in der Luft ist eine gewisse Zeit nötig, und man nennt die Strecke, längs welcher sich der Schall in einer Sekunde fortpflanzt, die Geschwindigkeit des Schalles. Man mißt sie, indem man etwa von einer Kanone sich um eine gemessene Strecke entfernt (5 *km*) und nun die Zeit beobachtet, welche zwischen der Wahrnehmung des Blitzes und des Kanonendonners verfließt (15 Sek.). Dadurch findet man die Geschwindigkeit des Schalles = 333 *m* in ruhiger Luft. (Zuerst gemessen von Gassendi † 1655). Wind vergrößert oder verkleinert diese Geschwindigkeit um seine eigene Geschwindigkeit, je nach nachdem er mit oder gegen den Schall weht.

Jeder Schall und jeder Ton pflanzt sich mit derselben Geschwindigkeit fort. Man hört deshalb eine Musik, Militärmusik, in der Entfernung ebenso, natürlich schwächer, wie in der Nähe. Der Donner entsteht dadurch, daß in allen Punkten der Blitzbahn zugleich ein Schall (Knall) entsteht, daß dessen einzelne Wellen aber verschieden lange Zeit brauchen, um zu unserm Ohre zu gelangen, das ja von den einzelnen Teilen der Blitzbahn verschieden weit ent-

fernt ist. Da der Schall in den einzelnen Teilen der Blitzbahn verschiedene Stärke hat, so erklärt sich hieraus das Rollen des Donners.

Der Schall pflanzt sich nicht bloß in der Luft, sondern in allen elastischen Körpern fort. So pflanzt sich der Schall im Wasser fort; denn man hört eine Glocke, die unter Wasser angeschlagen wird, und die Fische im Teiche hören die Glocke, die sie zur Fütterung ruft. Doch pflanzt sich der Schall im Wasser mit größerer Geschwindigkeit fort. Ebenso pflanzt sich der Schall in festen Körpern fort; wenn man die Taschenuhr an das eine Ende eines Baumstammes halten läßt, so kann man das Ticken derselben am anderen Ende ganz deutlich hören, da sich der Schall hiebei vorzugsweise im Baume fortpflanzt. Wenn man sich eine angeschlagene Stimmgabel auf den Kopf stellt, hört man sie, indem die Schwingungen der Gabel sich direkt durch die Knochen des Kopfes zum Ohre fortpflanzen. Ebenso erklärt sich das Faden- oder Schnurtelephon.

Auch in festen Körpern pflanzt sich der Schall rascher fort als in der Luft.

Wenn zwischen dem schallgebenden (schwingenden) Körper und unserem Ohre sich kein Körper befindet, so pflanzt sich der Schall auch nicht bis zu unserem Ohre fort, und wir hören ihn deshalb nicht. Es pflanzt sich demnach der Schall im luftleeren Raume nicht fort, was leicht durch einen Versuch an der Luftpumpe gezeigt werden kann. Wenn sich ein Schall in einem festen oder flüssigen Körper fortpflanzt, so geschieht dies auch in Form von longitudinalen, nach allen Richtungen sich ausbreitenden Wellen. Als Ursache der Fortpflanzung ist hiebei die Elastizität der Körper anzusehen. Denn wenn ein Teil eines Körpers (das eine Ende des Baumstammes) in schwingende Bewegung versetzt wird (durch Aufsetzen der Stimmgabel), so wird, wenn das schwingende Teilchen dem benachbarten genähert wird, eine abstoßende elastische Kraft thätig, und wenn das schwingende Teilchen sich vom benachbarten entfernt, so wird eine anziehende Kraft thätig; beide wirken ebenso wie die Druckunterschiede in der Luft, und bewirken, daß eine Welle entsteht und sich fortpflanzt. Schallwellen im Wasser sind auch longitudinale Wellen, die sich durch die ganze Wassermasse verbreiten, und also wohl zu unterscheiden von den transversalen Wellen, welche nur an der Oberfläche verlaufen und nur in verhältnismäßig geringe Tiefe hinabreichen.

Der Schall nimmt mit der Ausbreitung ab. Da wir kein bequemes Mittel besitzen, um Schallstärken zu messen, so müssen wir uns mit folgender theoretischen Betrachtung begnügen. Wenn der Schall sich nach allen Richtungen ungehindert ausbreiten kann, so hat die Wellenbewegung nach einer gewissen Zeit alle Punkte einer Kugelfläche erreicht; nach zweimal (3mal ꝛc.) längerer Zeit hat

sich die Wellenbewegung auf eine Kugelfläche von 2mal (3mal 2c.) größerem Radius, also 4mal (9mal . . . n^2mal) größerer Fläche ausgebreitet, also muß die Intensität der Wellenbewegung nun 4mal (9mal . . . n^2mal) schwächer sein. Man schließt also: die Schallstärke nimmt bei ungehinderter allseitiger Ausbreitung ab, wie das Quadrat der Entfernung zunimmt. Da wir den Pfiff der Lokomotive in 1 *m* Entfernung noch ertragen, in 10 *km* Entfernung, wobei seine Intensität $10\,000^2 = 100\,000\,000$mal schwächer ist, noch hören können, so erkennt man daran, innerhalb wie großer Grenzen unser Ohr noch empfindlich ist.

172. Reflexion des Schalles.

Trifft der Schall auf einen festen Körper, so wird er zurückgeworfen, reflektiert, ebenso wie die am Ufer ankommende Wasserwelle zurückgeworfen wird und nun den Weg rückwärts zurücklegt, und ebenso wie jeder elastische Ball von einer Wand zurückfliegt. Der Schall wird hiebei unter demselben Winkel reflektiert, unter welchem er auffällt, also nur wenn er senkrecht auffällt, geht er auf demselben Wege zurück.

Darauf beruht das Echo oder der Wiederhall, das Zurückkommen des Schalles, wenn er auf eine entfernte Wand trifft. Bekannt ist, daß auch ein Wald ein Echo gibt, also wie eine feste Wand wirkt, obwohl er aus einzelnen Blättern, Zweigen 2c. besteht, die nicht in derselben Ebene liegen; ein Teil des Schalles dringt dabei in das Innere des Waldes ein.

Ein mehrfaches Echo entsteht, wenn mehrere reflektierende Flächen in verschiedenen Entfernungen sich befinden; die nächstliegende Fläche liefert das erste, stärkste Echo, die ferner liegende gibt den Ton etwas später und schwächer zurück u. s. f. Um das Echo zu hören, muß man ziemlich weit von der Wand entfernt sein, weil man sonst den Schall und sein Echo in so rascher Aufeinanderfolge hört, daß das Ohr sie nicht als getrennt unterscheiden kann. Für ein einsilbiges Echo oder Händeklatschen muß man etwa 15 *m* von der Wand entfernt sein, für ein zweisilbiges mindestens doppelt so weit 2c.

Auf der Zurückwerfung des Schalles von festen Wänden beruht auch der Nachhall in geschlossenen Räumen, Zimmern, Sälen, Kirchen 2c. Es wird nämlich der Ton von den Wänden, von der Decke und dem Boden vielfach reflektiert, und so kommt es, daß man außer dem direkt zum Ohr gelangenden Tone auch noch Nachklänge des Tones hört, die wegen des größeren Weges etwas später ans Ohr gelangen. Beträgt diese Verspätung nur sehr wenig, wie meistens bei nur einmaliger Reflexion, so hört man Ton und Nachklang fast zu derselben Zeit; der Nachklang ver-

stärkt dann den direkten Ton. Deshalb kann man in Zimmern und geschlossenen Räumen sich leichter verständlich machen als im Freien; denn es nimmt die Schallstärke nicht ab, wie das Quadrat der Entfernung zunimmt, sondern in viel kleinerem Verhältnisse. Dies ist in großen Sälen, Kirchen und Theatern sehr erwünscht.

Wenn aber der Nachklang infolge mehrmaliger Reflexion auch noch zu merklich späterer Zeit kommt, so vermischt er sich mit dem folgenden Worte, mit den folgenden Tönen der Musik und bewirkt, daß beides nur undeutlich, unklar und verschwommen gehört wird. Bringt ein Raum nur einen kurzen Nachhall hervor, dessen Wellen nur so kurze Zeit nach den direkten Wellen ankommen, daß sie dieselben verstärken und dann so bald verschwinden, daß sie nicht störend in die Wellen des folgenden Tones eingreifen, so nennt man den Raum gut akustisch, sagt, er hat eine gute Akustik; ist der Nachhall aber lange dauernd, so daß man eine Rede nicht gut verstehen und die Musik nicht rein und klar vernehmen kann, so daß insbesondere rasch aufeinanderfolgende Töne sich zu einem unverständlichen Tongewirr vermischen, so nennt man den Raum schlecht akustisch.

Wie man den Raum zu bauen hat, damit er eine gute Akustik bekommt, ist bis jetzt noch nicht genau bekannt; man empfiehlt eine möglichst reiche Gliederung der Wände, Vermeidung glatter Flächen, Bekleidung der Wände mit weichem Material, also Holz und Tuch, anstatt mit harten Stoffen, wie Stein; es ist ja auch bekannt, daß ein leerer Saal stets schlechter akustisch wirkt, als ein mit Menschen gefüllter. Jedoch verhindert das nur, daß der Nachhall lang dauernd wird, bewirkt aber nicht, daß er stark ist und zugleich rasch aufhört, wie es am besten wäre.

Auf der Reflexion beruht auch das Sprachrohr (Moreland 1670). Es besteht aus einem Rohr aus Blech oder Pappe, welches am einen Ende eine der Mundweite entsprechende Öffnung hat, zu welcher man hineinspricht, und sich gegen das andere Ende derart erweitert, daß der Längsschnitt die in Fig. 219 gezeichnete Form einer Parabel hat. Die Schallwellen, welche in das Rohr eindringen, werden dann von den Wänden des Rohres so reflektiert, daß sie alle nahezu der Längsachse des Rohres parallel werden. Sie pflanzen sich dann auch, wenn sie das Rohr verlassen, vorzugsweise in dieser Richtung fort, treffen demnach einen weit entfernten Beobachter in viel größerer Stärke, als sie ihn hätten treffen können, wenn sie sich ungehindert hätten ausbreiten können.

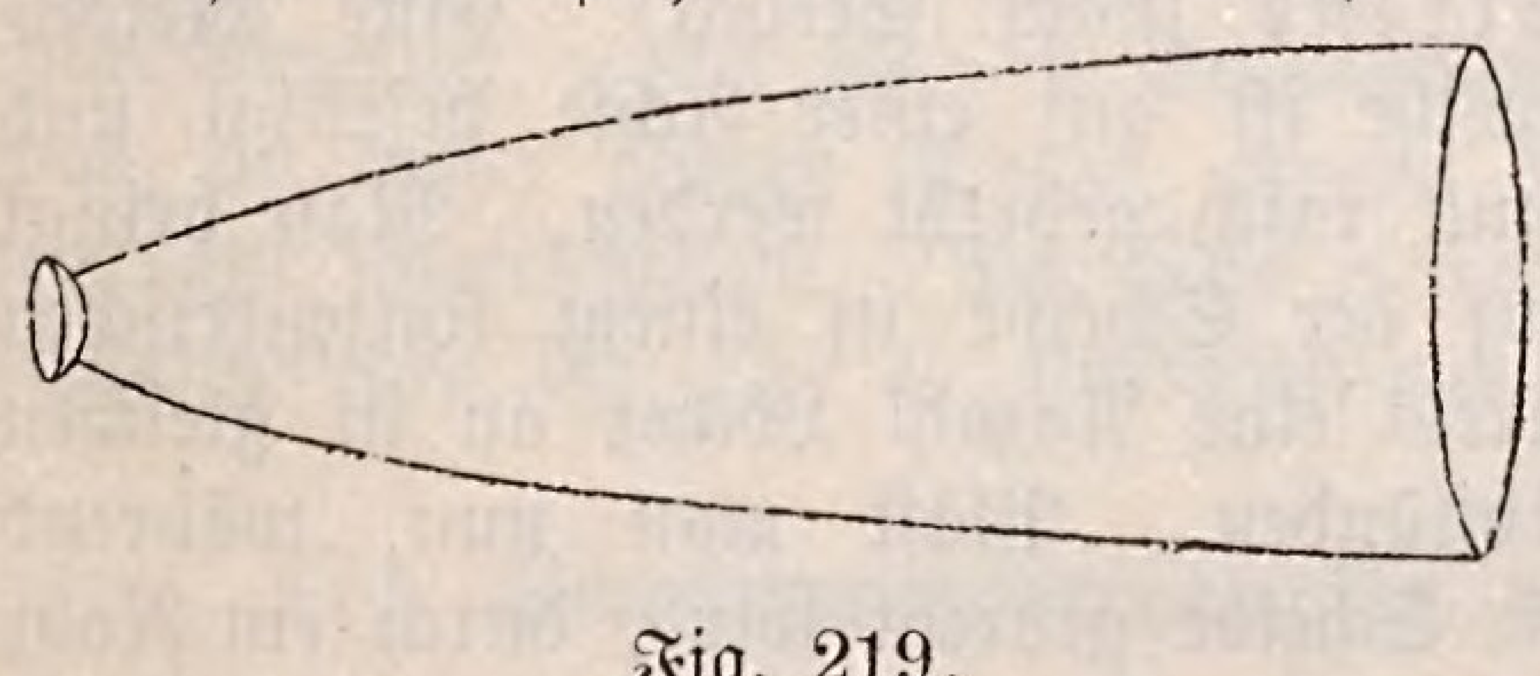


Fig. 219.

Deshalb lassen gute Sprachrohre das Gesprochene bei sonst stiller Luft bis auf $^1/_2$ Stunde Entfernung noch deutlich vernehmen.

Das Hörrohr dient dazu, um einen ankommenden schwachen Ton deutlich hörbar zu machen. Es ist trichterförmig gebogen, so daß die bei der weiten Öffnung eindringenden Wellen durch Reflexion an den Wänden des Hörrohres so abgelenkt werden, daß sie (nahezu) alle durch die gegenüberliegende kleine Öffnung desselben gehen und sich so verstärken. Hält man diese kleine Öffnung ans Ohr, so ist die Stärke des Tones (nahezu) so vielmal größer, als der Querschnitt der weiten Öffnung des Hörrohres größer ist als der natürliche Eingang des Ohres.

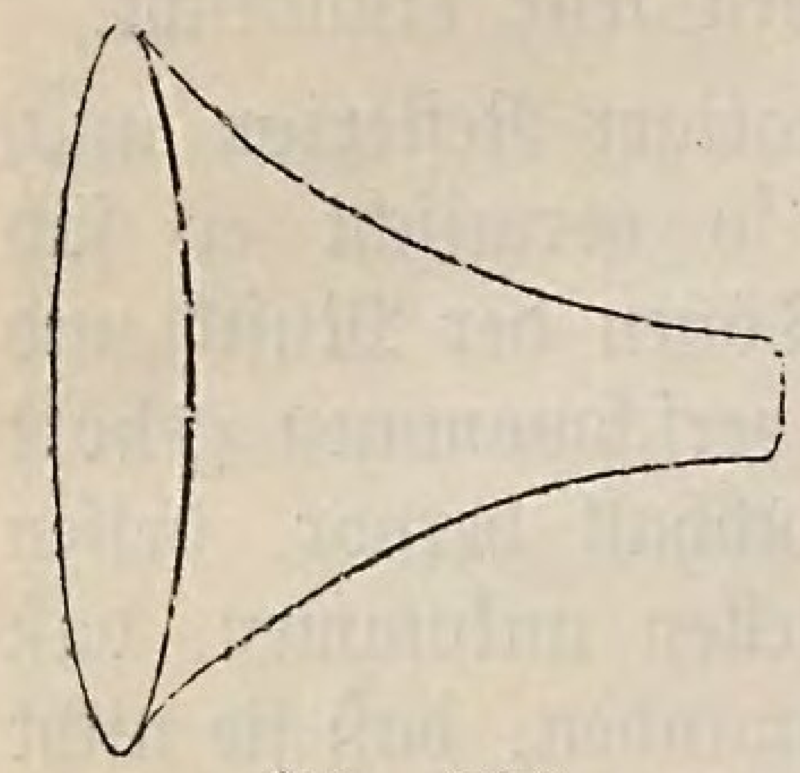


Fig. 220.

173. Der Ton. Schwingungszahl des Tones.

Wenn die Luftschwingungen in unregelmäßiger Aufeinanderfolge entstehen, so hört man einen Schall, dessen verschiedene Arten man durch die Bezeichnungen: Knall, Klirren, Brausen, Zischen, Rasseln ꝛc. zu unterscheiden sucht.

Ein Ton entsteht, wenn die Luftschwingungen regelmäßig erfolgen, so daß jede Schwingung gleich viel Zeit braucht. Ein Ton kann also nur hervorgebracht werden von einem Körper, welcher im stande ist, solche regelmäßige Schwingungen zu machen, also etwa von einer Glocke, Saite, Stimmgabel ꝛc.

Man unterscheidet die Töne nach der Höhe, und findet, daß der Ton um so höher ist, je mehr Schwingungen die Luft macht. Dies ersieht man an der Sirene (nach Seebeck). Eine Metallscheibe ist auf einer Achse befestigt und kann rasch gedreht werden. Man bringt auf der Scheibe in einem konzentrischen Kreis eine Anzahl Löcher an in gleichen Abständen. Bläst man nun, während die Scheibe gedreht wird, durch ein Rohr gegen die Lochreihe, so kann der Luftstrom bald durch ein Loch hindurchgehen, bald wird er von der Scheibe aufgehalten; es entstehen also abwechselnd Luftstöße, welche, da sie in rascher und gleichmäßiger Aufeinanderfolge entstehen, einen Ton hervorbringen. Dadurch ist auch bewiesen, daß der Ton aus Luft-

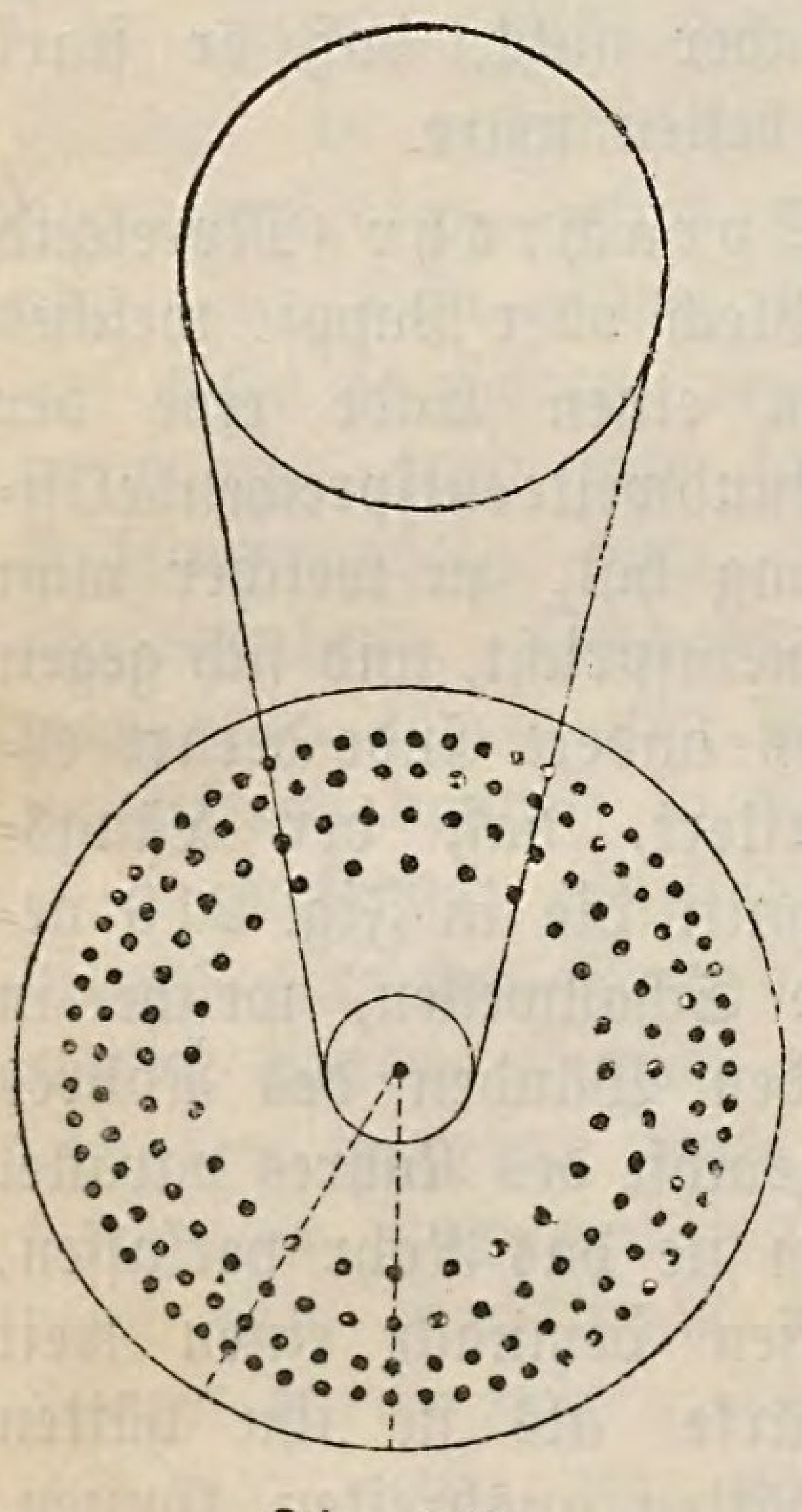


Fig. 221.

schwingungen besteht, und daß zu deren Hervorbringung ein schwingender Körper nicht notwendig ist. Bei raschem Drehen wird der Ton höher, bei langsamerem tiefer.

Dreht man mit gleichmäßiger Geschwindigkeit, so entsteht ein Ton von gleichbleibender Höhe, und aus der Anzahl der Löcher im Kreise und aus der Anzahl der Umdrehungen der Scheibe in 1″, kann man finden, wie viele Schwingungen der Ton in 1″ macht. Man findet so die Schwingungszahl des Tones.

Wir wissen, daß in der Zeit, in welcher ein Luftteilchen eine Schwingung macht, die Welle sich um ihre eigene Länge fortpflanzt. Wenn also ein Ton in einer Sekunde n Schwingungen macht und sich dabei in der Luft um 333 m fortpflanzt, so folgt, daß die Länge der Welle $= \frac{333}{n}$ Meter ist. Bezeichnet man allgemein die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles mit c und die Wellenlänge mit l, so ist $l = \frac{c}{n}$, oder $c = n \cdot l$. Man kann also aus der mittels der Sirene gefundenen Schwingungszahl eines Tones auch die Länge seiner Welle berechnen. Je tiefer der Ton, je kleiner also seine Schwingungszahl ist, desto länger ist seine Welle.

Jeder musikalische Ton ist nach seiner Höhe genau bestimmt durch seine Schwingungszahl, und kann somit durch dieselbe wieder gefunden werden. Zur genaueren Bestimmung der Schwingungszahl bedient man sich einer andern Art von Sirene, der Sirene von Cagniard Latour, dem Erfinder der Sirenen (1819). Der tiefste, in der Musik gebräuchliche Ton, das Contra-C, macht 33 Schwingungen, der höchste, das fünfgestrichene c macht 4224 Schwingungen, doch kann man noch 3 Oktaven darüber bis zum achtgestrichenen c mit 32 770 Schwingungen die Töne wahrnehmen, jedoch an dieser oberen Grenze, ebenso wie an der unteren, nicht mehr gut unterscheiden. Der Ton a der Stimmgabeln macht 435 Schwingungen bei 15° C: Normalstimmung.

174. Schwingungsverhältnisse musikalischer Töne.

Wichtiger als die absoluten Schwingungszahlen der Töne sind die Schwingungsverhältnisse derjenigen Töne, welche in der Musik gebräuchlich sind. Sie können leicht mittels der Sirene von Seebeck (Fig. 221) aufgefunden werden. Bringt man nämlich auf der Scheibe außer der ersten Lochreihe noch eine solche an, welche gerade doppelt so viele Löcher enthält, so findet man bei gleicher Umdrehungsgeschwindigkeit, daß stets die zweite Reihe die obere Oktave desjenigen Tones gibt, welchen die erste Reihe gibt.

Es ist dabei gleichgültig, wie rasch man die Scheibe dreht, wenn nur beide Reihen bei derselben Geschwindigkeit angeblasen werden. Da sich hiebei die Schwingungszahlen stets wie 1 : 2 verhalten, so sagt man: Grundton und Oktave haben das Schwingungsverhältnis 1 : 2, oder die Oktave macht in derselben Zeit stets doppelt so viele Schwingungen als der Grundton. Aus dem Satze über die Wellenlänge folgt dann, daß die Wellenlänge der Oktave stets 2mal kleiner ist als die des Grundtons.

Ähnlich findet man, daß stets das Schwingungsverhältnis von Grundton zu Quinte, also etwa: $c : g = 2 : 3$,
das von Grundton zu Quarte, also etwa: $g : \bar{c} = 3 : 4$,
das von Grundton zur (großen) Terz, also: $\bar{c} : \bar{e} = 4 : 5$ ist.

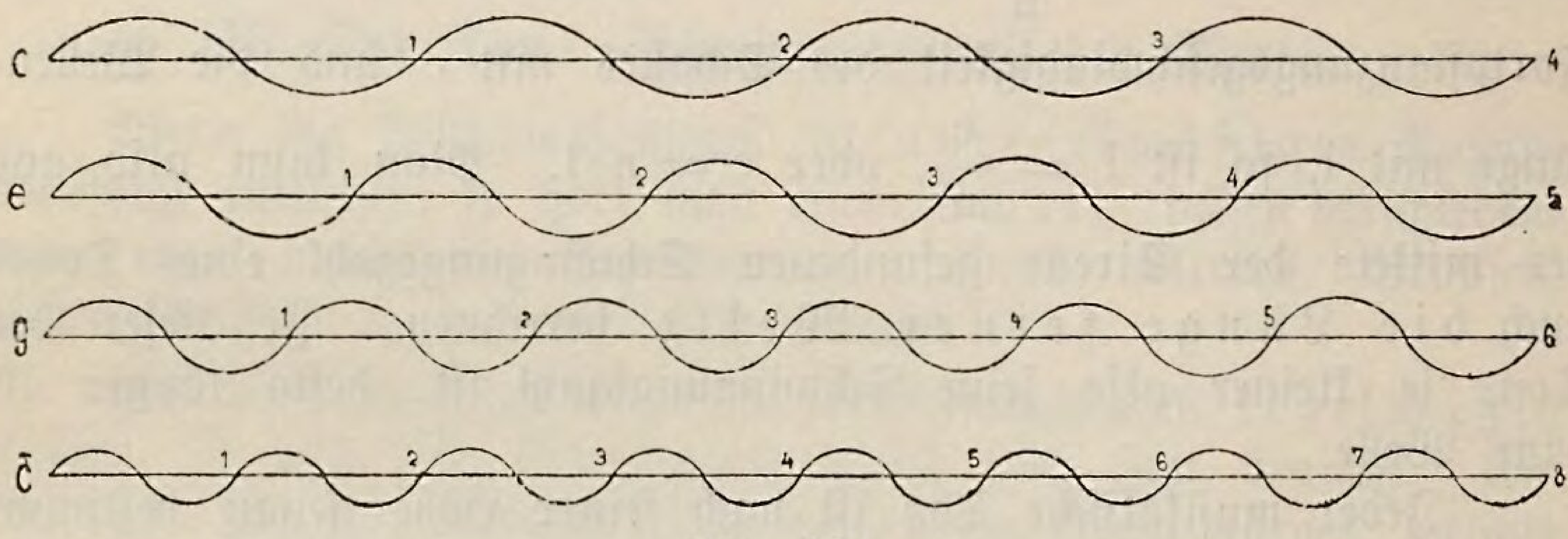


Fig. 222.

Der Dur-Dreiklang hat also folgende Schwingungsverhältnisse: $c : e : g : \bar{c} = 4 : 5 : 6 : 8$, und diese Schwingungsverhältnisse gelten nicht bloß von dem hier als Beispiel angegebenen von c zu $\bar{c}$ gehenden Dreiklang, sondern von jedem über einem beliebigen Grundton liegenden Dreiklang.

In Fig. 222 sind die Wellen angedeutet, welche einem Dur-Dreiklang entsprechen.

Den Musiker werden noch folgende Verhältnisse interessieren.

Man kann die Schwingungszahlen der Töne einer Dur-Tonleiter durch folgende Zahlen darstellen:

c	d	e	f	g	a	h	$\bar{c}$
24	27	30	32	36	40	45	48

das Schwingungsverhältnis der ganzen Töne ist

$$\frac{c}{d} = \frac{24}{27} = \frac{8}{9}; \quad \frac{f}{g} = \frac{32}{36} = \frac{8}{9}; \quad \frac{a}{h} = \frac{40}{45} = \frac{8}{9}.$$

Diese Intervalle nennt man große ganze Töne; ferner ist

$$\frac{d}{e} = \frac{27}{30} = \frac{9}{10}, \quad \frac{g}{a} = \frac{36}{40} = \frac{9}{10},$$

diese Intervalle sind **kleine ganze Töne**. Der Unterschied beider ist $\frac{8}{9} \cdot \frac{10}{9} = \frac{80}{81}$; d. h. in diesem Verhältnis ist $\frac{9}{10}$ kleiner als $\frac{8}{9}$; den Bruch $\frac{80}{81}$ nennt man ein **Komma**.

Das Schwingungsverhältnis der halben Töne ist

$$\frac{e}{f} = \frac{30}{32} = \frac{15}{16} \text{ und } \frac{h}{c} = \frac{45}{48} = \frac{15}{16}.$$

Schaltet man zwischen c und d einen halben Ton ein, cis, so ist seine Schwingungszahl $24 \cdot \frac{16}{15} = 25{,}6$ und setzt man nach cis wieder einen halben Ton vom Verhältnis $\frac{16}{15}$, so wird seine Schwingungszahl $\frac{25{,}6 \cdot 16}{15} = 27{,}3$ also höher als d; es sind also die Intervalle der zwei halben Töne zwischen c und d, f und g, a und h kleiner als der halbe Ton zwischen e und f.

Noch größer wird der Unterschied, wenn man zwischen die kleinen ganzen Töne halbe Töne einschaltet; denn hat d die Schwingungszahl 27, so hat dis $27 \cdot \frac{16}{15} = 28{,}8$, und e hat 30, also ist das Intervall $\frac{dis}{e} = \frac{28{,}8}{30} = \frac{24}{25}$ also viel kleiner als der halbe Ton $\frac{d}{dis}$; beide sind um mehr als ein Komma verschieden.

Wir haben die Schwingungsverhältnisse der Töne der Durtonleiter kennen gelernt, nämlich

c	d	e	f	g	a	h	$\bar{c}$	
Grundton,	$\frac{9}{8}$,	$\frac{10}{9}$,	$\frac{16}{15}$,	$\frac{9}{8}$,	$\frac{10}{9}$,	$\frac{9}{8}$,	$\frac{16}{15}$,	und

bemerken noch, daß diese Verhältnisse nicht etwa bloß für die c-dur-Tonleiter, sondern für jede über einem beliebigen Grundton aufgebaute Tonleiter gelten. Wenn also der Musiker rein spielen will, so muß die diesen Verhältnissen entsprechende Aufeinanderfolge von großen und kleinen ganzen Tönen und von halben Tönen der angegebenen Größe stattfinden. Der Musiker achtet auch hierauf beim Singen und Geigen; aber bei Klavier und Orgel, wo die Bildung der Tonhöhe nicht in seiner Hand liegt, würden Unzuträglichkeiten entstehen, sobald man aus einer andern Tonart spielt. Ist z. B. auf der Orgel die c-dur-Tonleiter den angegebenen Verhältnissen gemäß gestimmt, so kann man auf ihr in c-dur ganz rein spielen;

geht man aber nach g-dur über, so muß zunächst der grobe Fehler beseitigt werden, daß zwischen e und f nur ein halber Ton liegt, während an dieser Stelle, wenn g Grundton ist, ein ganzer Ton liegen soll: diesem hilft man bekanntlich dadurch ab, daß man f um einen halben Ton erhöht, also zwischen f und g einen halben Ton einschaltet, mit fis bezeichnet und durch ein vorgesetztes ♯ andeutet.

Aber jetzt würde die so korrigierte Tonleiter (G-dur) wohl im groben richtig, aber noch nicht rein sein, denn schon das erste Intervall $\frac{g}{a}$ ist ein kleiner ganzer Ton, während es ein großer sein sollte, und das umgekehrte findet beim nächsten Intervall $\frac{a}{h}$ statt. Ähnliches findet statt, wenn man auf noch andere Tonarten übergeht. Wenn man also auf der Orgel die Töne für eine Tonleiter genau richtig macht, so passen sie nicht ganz für die anderen Tonarten.

Diesen Übelstand kann man nicht ganz vermeiden, sondern bloß vermindern dadurch, daß man auf ganz reine Stimmung überhaupt verzichtet und eine Universalskala einführt, welche für jede Tonart gleich gut, wenn auch für keine vollkommen paßt. Man teilt nämlich das Schwingungsverhältnis der Oktave (2 : 1) in 12 gleiche Intervalle, so daß jeder folgende halbe Ton gleich vielmal öfter schwingt als der vorhergehende, also gleichschwebende Temperatur hat. Ein halber Ton hat also das konstante Schwingungsverhältnis $\sqrt[12]{2}$, welches nahezu $= \frac{16}{15} \cdot \frac{147}{148}$ ist, sich also auch vom halben Tone $\frac{16}{15}$ sehr wenig $\left(\frac{147}{148}\right)$ unterscheidet. Den so erhaltenen halben Tönen gibt man dann die in der Musik eingeführte Bezeichnung (c, cis, d, dis, u. s. w.) und benützt sie zur Bildung jeder Tonart. Hiebei werden die Oktaven natürlich alle ganz rein, die Quinten und Quarten fast vollkommen rein, denn für die Quinte, den siebenten halben Ton, hat man $\sqrt[12]{2^7} = \frac{3}{2} \cdot \frac{885}{886}$, also sehr nahe $\frac{3}{2}$ und für die Quarte, den 5. halben Ton, ist $\sqrt[12]{2^5} = \frac{4}{3} \cdot \frac{886}{885}$; dagegen weichen die Terzen und Sexten von den reinen Intervallen beträchtlicher ab, jedoch um weniger als ein Komma.

Aus den angegebenen Schwingungsverhältnissen musikalischer Töne erkennt man das Gesetz, daß uns das Zusammenklingen zweier oder mehrerer Töne nur dann eine angenehme Empfindung verursacht, wenn die Schwingungszahlen in einem durch kleine ganze Zahlen

ausdrückbaren Verhältnisse stehen (oder nur sehr wenig davon abweichen wie bei der gleichschwebenden Temperatur). Zwei Töne, welche im Schwingungsverhältnis 1 : 2 stehen, wie Grundton und Oktave geben also den einfachsten Zusammenklang, die vollkommenste Harmonie, und diese scheint uns so groß zu sein, daß wir zwei solche Töne im Wesen gar nicht als verschieden ansehen, daß wir sagen, die Oktave ist wieder derselbe Ton, nur in höherer Lage, und daß wir sie demgemäß wieder mit demselben Buchstaben bezeichnen. Quinte, Quarte und Terz, als Zweiklänge, und den bekannten Dur-Dreiklang fühlen wir als harmonische Zusammenklänge und ihre Schwingungsverhältnisse sind auch durch einfache Zahlen ausgedrückt. Je größer diese Verhältniszahlen werden, um so unangenehmer wirkt der Zusammenklang auf unser Ohr, derart, daß wir den Zusammenklang als unbefriedigend empfinden, als etwas, das der Auflösung bedarf, oder daß wir ihn sogar als Disharmonie empfinden, die das Ohr beleidigt.

175. Schwingende Saiten.

Wird eine Saite zwischen zwei festen Punkten gespannt, wie bei den Geigen, der Zither, dem Klavier u. s. w., so gibt sie einen Ton, wenn man sie mit einem Bogen streicht oder zupft oder mit einem „Hammer" schlägt. Sie wird dadurch nämlich aus ihrer Gleichgewichtslage gebracht, wird gebogen, erhält eine größere Länge und kehrt vermöge ihrer Elastizität in die Gleichgewichtslage zurück, schwingt vermöge des Beharrungsbestrebens über dieselbe hinaus nach der anderen Seite, kehrt zurück u. s. f.; sie macht also Schwingungen um die Gleichgewichtslage, und da diese Schwingungen regelmäßig erfolgen, so bringt sie einen Ton hervor.

Die Höhe dieses Tones ist abhängig von der Spannung der Saite, je stärker sie gespannt ist, desto höher ist der Ton; ferner vom Gewicht der Saite, je schwerer die Saite ist, desto langsamer sind die Schwingungen; deshalb benützt man auf den Saiteninstrumenten für die tieferen Töne Saiten, welche mit Draht, oft sehr dickem Draht, umsponnen sind; dieser Draht hat nur den Zweck, der Saite ein größeres Gewicht zu geben. Schließlich ist die Tonhöhe abhängig von der Länge der Saite und zwar sind die Schwingungszahlen den Längen umgekehrt proportional.

Macht man also eine Saite zweimal kürzer, so gibt sie die Oktave, dreimal kürzer, die Quinte, viermal kürzer, die zweite Oktave rc. Der Violinspieler verkürzt die Saiten, indem er mit den Fingern die Saiten auf das Griffbrett drückt, und bringt so die verschiedenen Töne hervor.

Sehr wichtig für alle Saiteninstrumente ist die Resonanz, das ist das Mitschwingen eines festen elastischen Körpers, um den Ton der Saite zu verstärken. Hält man nämlich eine Saite mit

den zwei Händen gespannt und läßt sie nun anzupfen, so gibt sie wohl einen Ton, aber derselbe ist kaum hörbar. Zur Verstärkung dient der Resonanzboden oder -kasten. Befestigt man die Saite an zwei Punkten, die auf einer sehr gut elastischen Holzplatte, dem Resonanzboden, aufsitzen, so teilt sich die Schwingung der Saite der ganzen Holzplatte mit, das Holz gerät in ebensolche Schwingungen und teilt diese der Luft mit, und da nun das Holz eine breite, weit ausgedehnte Platte ist, so setzt sie große Massen von Luft in Bewegung und bringt dadurch einen starken Ton hervor. So besteht die Geige aus einem ganzen Resonanzkasten, die Saite ist mit beiden Enden auf Teilen desselben befestigt, und liegt noch auf dem „Steg" auf, der auf dem Resonanzboden selbst steht; auch das Klavier hat einen Resonanzboden als wichtigsten Bestandteil. Das zu Resonanzböden verwendete Holz muß sehr gut elastisch sein, so daß es jede Art von Schwingung leicht annimmt; man wählt dazu weiches Tannenholz von möglichst gleichmäßiger Struktur und frei von Ästen.

Ein physikalischer Apparat dieser Art ist das Monochord. Es besteht aus einem einfachen langen Kasten aus Holz, dessen obere

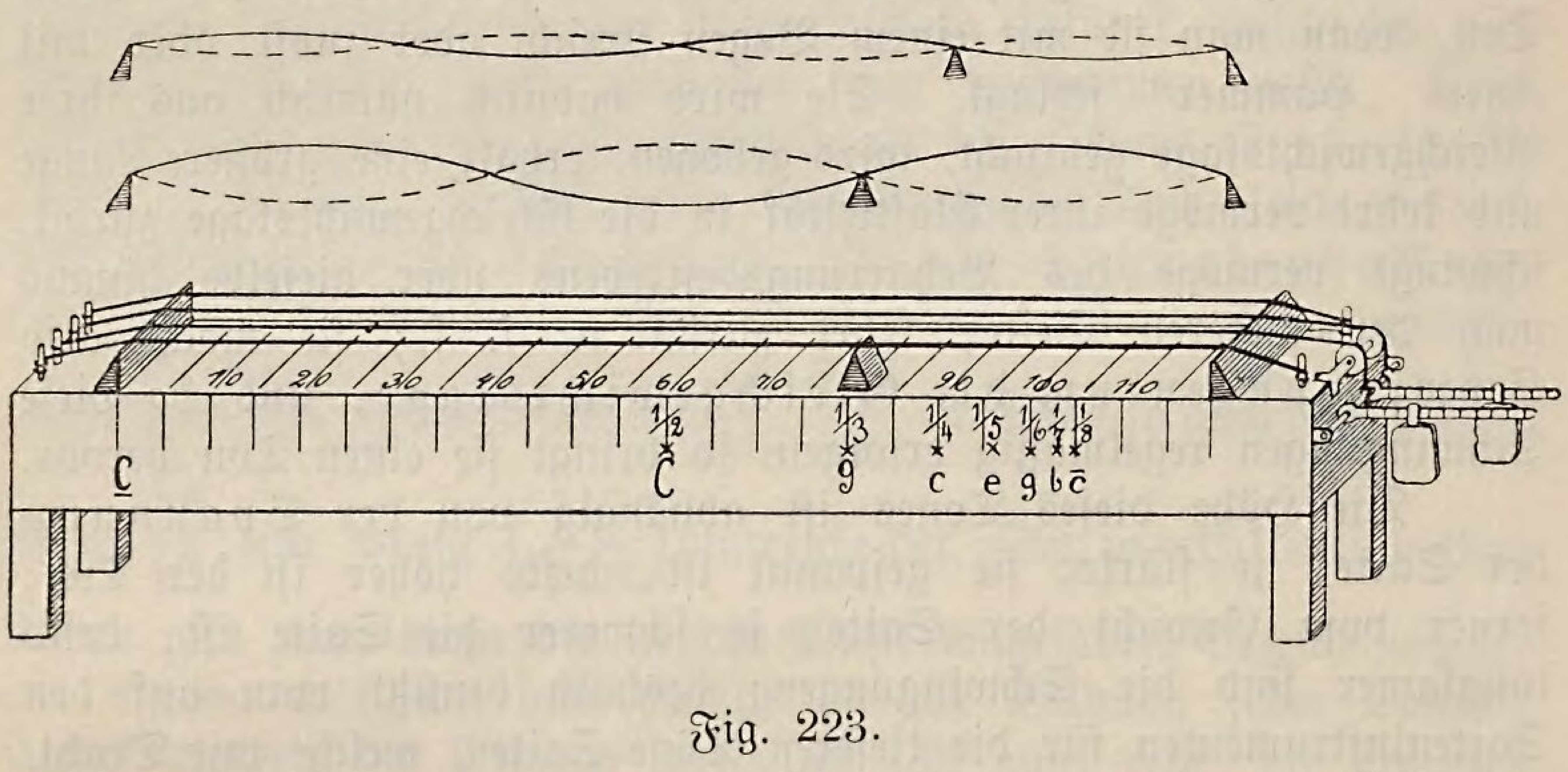


Fig. 223.

Platte den Resonanzboden vorstellt; über ihn wird eine Saite gespannt, die vorn und hinten über keilförmige Holzschneiden (Stege) geht. Die Länge zwischen beiden Schneiden ist die Länge der schwingenden Saite. Man hat noch einen beweglichen Steg, den man zwischen beide stellen kann, so daß die Saite verschiedene Längen bekommt. Indem man mittels des Steges die Länge der Saite 2, 3, 4 ꝛc. mal kürzer macht und die erhaltenen Töne untersucht, findet man leicht das oben angegebene Gesetz.

176. Obertöne.

Wenn man die Saite genau in der Mitte zwischen den festen Stegen durch den beweglichen Steg unterstützt, und die eine Hälfte

anstreicht, so gibt sie die Oktave; dabei schwingt auch die andere Hälfte der Saite mit, und zwar ebenso rasch, gibt also denselben Ton. Beide Hälften der Saite machen dabei ihre Schwingungen stets in entgegengesetzter Richtung. Wenn man die Saite im ersten Drittel unterstützt und das erste Drittel etwa in der Mitte anstreicht, so schwingt auch der andere Teil der Saite mit, aber nicht

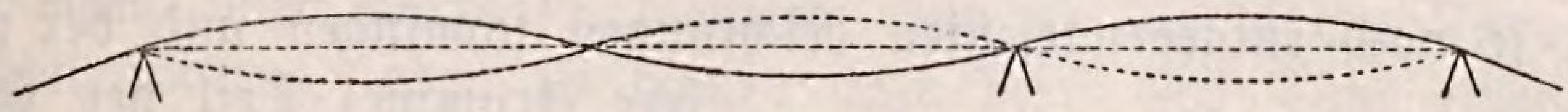


Fig. 224.

als ganzes, sondern indem er sich in zwei Teile, die zwei anderen Drittel, teilt, deren jedes so rasch schwingt wie das angestrichene Drittel und also denselben Ton hervorbringt. Der Punkt zwischen den beiden Teilen schwingt hiebei gar nicht, bleibt in Ruhe und wird Schwingungsknoten genannt. Man kann das sehen, wenn man auf die Saite kleine Papierschnitzel steckt (Reiterchen); denn durch die Schwingungen der Saite werden alle Reiterchen abgeworfen, nur das am Schwingungsknoten sitzende bleibt ruhig. Ähnliches tritt ein, wenn man die Saite im ersten Viertel, Fünftel, Sechstel rc. unterstützt. Anstatt hiebei mittels des Steges zu unterstützen, genügt es, sie leicht mit dem Finger zu berühren. Man sagt, die Saite teilt sich in aliquote Teile und gibt Obertöne statt des Grundtones, wobei unter Oberton ein Ton zu verstehen ist, der eine ganze Anzahl mal öfter schwingt als der Grundton. Diese Versuche sowie die Benennung „Knoten und Bäuche" rühren von Saveur † 1716 her.

Aber auch wenn man die Saite nicht mit dem Finger berührt, sondern frei mit dem Bogen anstreicht, teilt sich die Saite stets zugleich in aliquote Teile und zwar in mehrere Arten; sie schwingt also zugleich als Ganzes und als in zwei Teile geteilt, oder als Ganzes und als in zwei und zugleich als in drei Teile geteilt, oder schwingt in noch mehr Teilen. Es entstehen somit stets außer dem Grundtone zugleich ein oder mehrere Obertöne. Diese Obertöne sind meist einzeln nicht hörbar, einerseits weil sie zu schwach sind, andrerseits weil unser Ohr nicht geübt ist, auf sie zu achten; wohl aber beeinflussen sie je nach ihrer Anzahl, Art und Stärke den Klang des Grundtones, und da es der geschickte Geiger in der Hand hat, durch verschiedenartiges Streichen mit dem Bogen verschiedene Obertöne dem Grundtone beizumischen, so ist er im stande, dem Tone verschiedenartigen Klang zu geben, insbesondere ihn weich, hart, hohl, scharf, schneidig, zart, spitzig rc. zu gestalten und so dem Vortrag des Musikstückes den gewünschten Ausdruck, die richtige Empfindung zu verleihen.

177. Schwingende Stäbe und Platten.

Ist ein elastischer Stab am einen Ende festgeklemmt und wird er am anderen Ende angeschlagen, so macht er Schwingungen und erzeugt einen Ton. Ähnlich wie eine Saite kann er sich dabei auch in mehrere Teile teilen. Die bekannte Stimmgabel ist ein schwingender Stab, welcher sich in drei Teile teilt, so daß die beiden Zinken je nach entgegengesetzten Richtungen schwingen und der mittlere (krumme) Teil der Gabel auch entsprechende Schwingungen macht; diese gehen, wenn die Gabel vertikal gehalten wird, auf- und abwärts, und daher kommt es, daß sie sich so leicht einer Platte mitteilen, auf welche die Stimmgabel gestellt wird; das Mitschwingen der Platte (Resonanz) verstärkt den Ton der Stimmgabel wesentlich. Doch liegen bei einer Stimmgabel die Knotenpunkte viel näher am krummen Teile als in Fig. 225 gezeichnet.

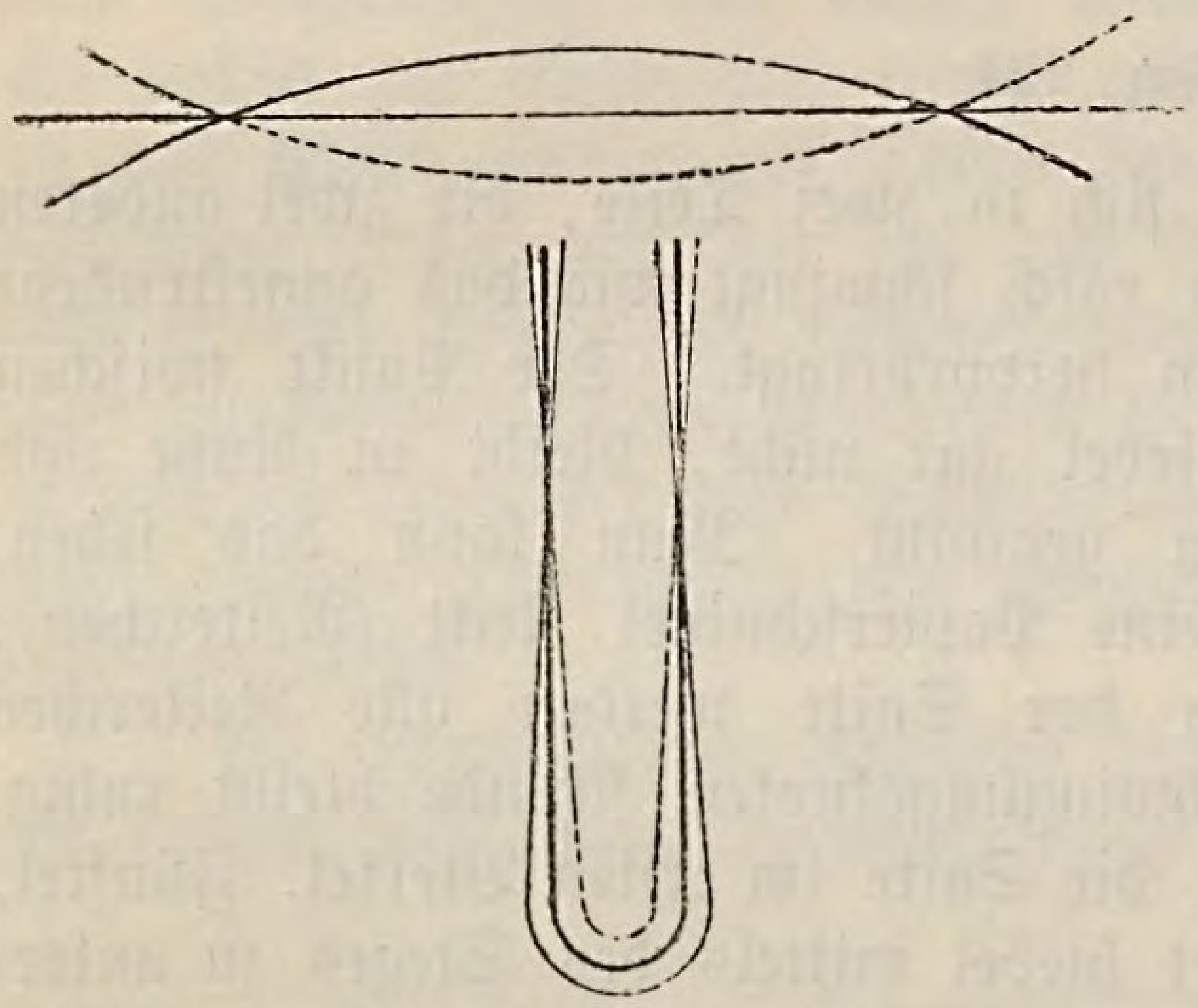


Fig. 225.

Nur wenn die Platte längs einer ganzen Seite befestigt ist, kann sie als Ganzes schwingen wie ein elastischer Stab; ist sie nur in einem Punkte befestigt, so teilt sie sich stets in mehrere Teile, von denen jeder für sich schwingt. Dies sieht man schön, wenn man eine Glasscheibe an einem Punkte, etwa in der Mitte, festklemmt durch eine Schraube, sie mit etwas Sand bestreut und nun am Rande anstreicht, etwa in der Mitte einer Seite. Sie gibt dann einen Ton, und man sieht, wie die Sandkörner von den schwingenden Teilen der Platte weggeschleudert werden und an den ruhigen Stellen sich ansammeln. Die Sandkörner sammeln sich etwa längs der Diagonalen der Scheibe und man sieht, daß sich die Scheibe in vier schwingende Teile geteilt hat, die getrennt sind durch die Knotenlinien, Diagonalen. Streicht man andere Stellen der Platte, unterstützt eine Stelle mit dem Finger, oder klemmt die Platte an einer anderen Stelle fest, so erhält man andere Einteilungen der Platte, der Sand sammelt sich längs anderer Linien und es entstehen so die Chadnischen Klangfiguren. Zwei benachbarte, durch eine solche Linie getrennte Felder schwingen stets gleich rasch und nach entgegengesetzten Richtungen.

Ebenso wie Platten schwingen die Glocken; bei ihnen ist der oberste Punkt der feste Punkt; durch ihn gehen die Knotenlinien; die zwischen ihnen liegenden, gleich großen Teile der Glocke schwingen

jeder für sich, jeder stets entgegengesetzt wie der benachbarte; die Anzahl der Teile ist daher stets eine gerade und der Ort, wo die Glocke angeschlagen wird, befindet sich in der Mitte eines solchen Teiles. Die Glocke teilt sich am einfachsten in 4 Teile. Ähnlich wie eine Saite zerlegt sich aber auch eine Glocke zugleich noch in eine andere Anzahl Teile, z. B. 6 oder 8, und bringt dadurch noch einige andere Töne, Obertöne, hervor; von diesen sind manchmal einer oder einige so deutlich, daß sie als eigene Töne gehört werden können, oder sie tragen dazu bei, dem Tone einen eigentümlichen Klang zu verleihen.

178. Stehende Wellen in gedeckten Pfeifen.

Nimmt man eine Röhre, die am einen Ende verschlossen, am andern offen ist, und erregt vor dem offenen Ende einen Ton, indem man etwa ein elastisches Stahlblech mit einem Ende festklemmt, und am freien Ende anschlägt, so daß es Schwingungen macht, so kommt auch die Luft in der Röhre in eine besondere Art schwingender Bewegung, welche man eine stehende Welle nennt. Dringt nämlich die Luftwelle in das Innere der Röhre, so wird sie vom verschlossenen Ende reflektiert und kehrt also auf demselben Wege zurück; es müßte demnach jedes in der Röhre enthaltene Luftteilchen zweierlei Bewegungen zugleich machen, eine infolge der eindringenden Luftwelle, die andere infolge der reflektierten Luftwelle; diese beiden Bewegungen setzen sich zusammen zu einer einzigen resultierenden Bewegung nach einfachen Gesetzen; man sagt, beide Wellen, die direkte und reflektierte, interferieren sich, und die wirkliche (resultierende) Bewegung, welche die Luftteilchen haben, nennt man eine stehende Welle.

Wir betrachten zunächst, was am Ende der Röhre geschieht. Wegen der Verschlußplatte können die letzten Luftteilchen überhaupt keinen Weg machen, bleiben also ruhig. Kommt eben ein Wellenberg, also verdichtete Luft am Ende an, so verstärkt sich die Verdichtung durch den reflektierten Teil des Wellenberges, ähnlich beim Wellenthal. Also am Ende der Röhre ist die Luft ruhig, aber abwechselnd stark verdichtet und stark verdünnt. Wir betrachten einen Punkt, welcher vom Ende um eine halbe Wellenlänge entfernt ist; ist in ihm der Anfang oder irgend ein Teil des Wellenberges, so ist in ihm auch der Anfang oder der entsprechende Teil des Wellenthales; sollte also der Punkt infolge der ersten Ursache etwa nach hinten gehen, so müßte er infolge der zweiten Ursache gerade mit derselben Geschwindigkeit nach vorn gehen, der Punkt macht also auch keine Bewegung, er bleibt in Ruhe. — Ist in ihm eben verdichtete Luft infolge der ersten Welle, so ist in ihm auch verdichtete Luft infolge der reflektierten Welle, beide verstärken sich; dasselbe

gilt von der verdünnten Luft. In diesem Punkte ist also auch die Luft abwechselnd verdichtet und verdünnt und ruhig. Beide Punkte nennt man **Knotenpunkte**; je nach der Länge der Röhre können noch mehrere Knotenpunkte vorhanden sein, ihr gegenseitiger Abstand beträgt stets eine halbe Wellenlänge. Wir betrachten den Punkt zwischen dem letzten Knotenpunkt und dem verschlossenen Ende und zwar den, der um $1/4$ Wellenlänge von der Wand entfernt ist. Es sind in ihm die beiden vorhandenen Wellenteile stets um $1/2$ Wellenlänge verschieden, also ist in ihm die Luft weder verdünnt noch verdichtet, da in Punkten der Welle, die um $1/2$ Wellenlänge verschieden sind, Verdichtung und Verdünnung stets einander der Größe nach gleich sind. Der Punkt machte eine hin- und hergehende Bewegung, da Punkte, die auf der Welle um $1/2$ Wellenlänge entfernt

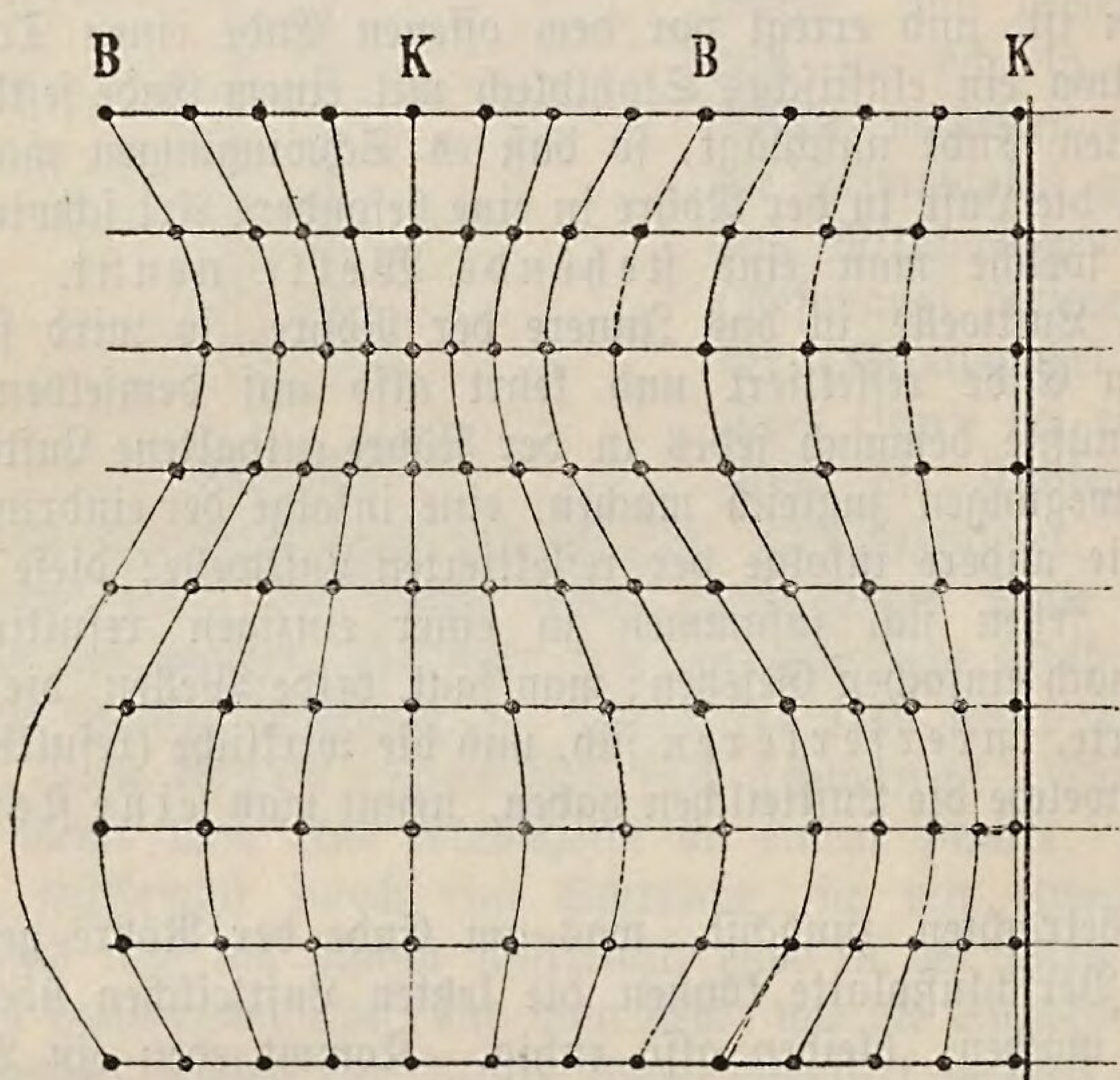


Fig. 226.

sind, entgegengesetzte, also nach der Reflexion gleich gerichtete Geschwindigkeiten haben, die sich also verstärken. Diese Stellen nennt man die **Wellenbäuche**, zwischenliegende Punkte machen eine der Art und Größe nach ähnliche Bewegung.

In der Röhre entstehen also Schwingungsknoten je $1/2$ Wellenlänge entfernt, in ihnen ist die Luft ruhig; zwischen je zwei Schwingungsknoten ist ein Wellenbauch, in welchem sich die Luft bewegt, abwechselnd auf den einen und auf den anderen Knoten zugehend. Dadurch verdichtet sich die Luft in dem Knoten, auf den sie zugeht, und verdünnt sich in dem Knoten, von dem sie weggeht. Die Luft in zwei benachbarten Bäuchen macht stets der Richtung nach ent-

gegengesetzte Bewegungen, also geht bei einem Knoten stets die Luft von beiden Seiten zu oder von beiden Seiten weg.

Am offenen Ende der Röhre, wo sich der schwingende Körper befindet, muß die Luft die Bewegung des schwingenden Körpers mitmachen können, muß sich also wie in einem Wellenbauch bewegen können; es muß deshalb die Länge der Röhre sich nach der Wellenlänge richten oder umgekehrt. Die Länge der Röhre muß also entweder $= {}^1/_4$ der Wellenlänge des erzeugten Tones sein oder $= {}^1/_4\,l + {}^1/_2\,l$, wobei ein freier Knoten entsteht oder $= {}^1/_4\,l + 2 \cdot {}^1/_2 l$, wobei 2 freie Knoten entstehen, oder $= {}^1/_4\,l + 3 \cdot {}^1/_2\,l$, wobei 3 freie Knoten entstehen. In einer Röhre von gegebener Länge kann also nur eine Welle entstehen, deren Länge $= 4$ mal die Rohrlänge ist, oder deren Länge $= 4 \cdot {}^1/_3$ die Rohrlänge, oder $4 \cdot {}^1/_5$ die Rohrlänge ist u. s. f.

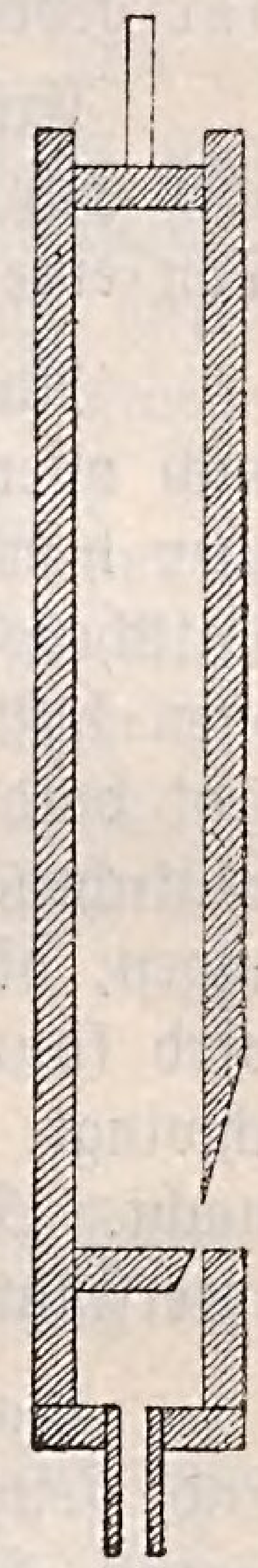


Fig. 227.

Weil hiebei die Wellen im Rohre scheinbar nicht fortschreiten, sondern die Luft zwischen festen Knoten hin- und herschwingt, so nennt man solche Wellen **stehende** Wellen.

Aus der Fig. 226 kann man ersehen, wie die Luftteilchen von den Bäuchen B aus auf die Knoten K zu- resp. von ihnen weggehen und dadurch abwechselnd Luftverdichtung und -verdünnung in den Knoten hervorbringen.

Hierauf beruhen die **gedeckten Orgelpfeifen**. Sie bestehen aus einem Rohre von gewisser Länge ($= {}^1/_4$ der gewünschten Wellenlänge). Am oberen Ende ist es geschlossen, ebenso am unteren Ende; doch ist dort ein feiner Spalt längs einer Seitenwand offen gelassen, durch welchen Luft in das Rohr, die Pfeife, von unten geblasen wird; von der Seitenwand, welche an diesen Spalt grenzt, ist ein Teil unten weggenommen, so daß also die Pfeife dort offen ist. Von der durch den Spalt eindringenden Luft geht ein Teil in die Röhre und bringt dort eine Luftverdichtung hervor. Diese bewirkt, daß die Luft sich ausdehnt, bei der Öffnung austritt und zugleich die aus dem Spalt kommende Luft seitwärts nach außen drückt. Ist die Luft so verdünnt, so strömt wieder Luft vom Spalt in das Innere, die Luft verdichtet sich wieder und so geht es fort. Die Luft in der Pfeife bewegt sich wie eine stehende Welle von ${}^1/_4$ Wellenlänge und dadurch, daß bei der unteren Öffnung bald Luft heraus- und hineingeht, entstehen in der äußeren Luft Schwingungen, also ein Ton. In gewissen Fällen, (bei stärkerem Blasen, geringerer Weite des Rohres) kann sich die Luft in der Pfeife auch so bewegen, daß ein freier Knoten entsteht, die Wellenlänge ist dann dreimal kürzer, der Ton hat dreimal mehr Schwingungen.

179. Stehende Wellen in offenen Pfeifen. Blasinstrumente.

Ist die Röhre (Pfeife) offen, so können auch stehende Wellen entstehen, doch muß stets mindestens ein freier Knoten in der Pfeife sein. Bildet sich nur ein Knoten, so liegt er in der Mitte und die Wellenlänge ist gleich der doppelten Pfeifenlänge; bilden sich zwei Knoten oder mehrere, so sind sie stets um $^1/_2$ Wellenlänge entfernt und liegen so, daß die Enden der Röhre Schwingungsbäuche sind; bei zwei Schwingungsknoten z. B. ist die Wellenlänge gleich der Pfeifenlänge, und die Schwingungszahl doppelt so groß als bei einem Knoten. Zudem sieht man, daß bei gleicher Pfeifenlänge die Wellenlänge in der offenen zweimal kürzer, also die Schwingungszahl zweimal größer ist als in der gedeckten; demnach gibt die offene Pfeife die Oktave der gedeckten.

Eine solche offene Pfeife ist die Flöte, bei welcher durch Öffnen oder Schließen der Löcher die Länge der Pfeife geändert und so dem Ton eine verschiedene Höhe gegeben werden kann.

Nahe verwandt sind Klarinett, Hoboe und Fagott; sie sind auch offene Pfeifen, die Luftschwingung am Anfang derselben wird aber hervorgebracht durch die Schwingungen eines elastischen Holzblättchens, das für die einströmende Luft nur einen schmalen Spalt offen läßt, selbst in Schwingungen gerät und so die Luft bald einläßt bald nicht einläßt; die Schwingungen dieses weichen elastischen Blättchens (weiche Zunge) richten sich aber nach den Schwingungen, die in der Röhre entstehen, so daß, wenn die Röhre kürzer wird (durch Öffnen der Klappen), also die Luft in der Röhre rascher schwingt, auch das Blättchen genau ebenso rasche Schwingungen macht. Durch kräftigeres oder schwächeres Andrücken der Lippen unterstützt der Bläser diese Wirkung.

Harte Zungen, wie federnde Metallbleche die an einem Ende festgemacht sind und mit dem anderen Ende frei schwingen, können sich in ihrer Schwingungszahl nicht nach der Länge des Rohres richten; hiebei wird die Länge des Rohres entsprechend der Schwingungszahl der Feder gemacht; oder es ist eine solche harte Zunge gerade vor einem Ausschnitt in einem Stück Holz angebracht, so daß sie diesen Ausschnitt gerade bedeckt; bläst man durch das Loch, so gerät die Zunge (Feder) in Schwingungen, verschließt und öffnet so den Ausschnitt, so daß die Luft bald heraus kann, bald nicht, und bringt so Stöße in der Luft hervor, die einen Ton erzeugen. Frei in der Luft schwingend wäre der von der Feder allein erzeugte Ton sehr schwach. Solche harte Zungen sind angewandt bei der Mundharmonika, der Ziehharmonika, dem Harmonium und vielen Orgelregistern.

Alle Blechblasinstrumente (Trompete, Horn, Piston, Posaune, Bombardon u. s. w.) sind sehr lange, oft vielfach gewundene, offene Pfeifen von verhältnismäßig geringer Weite. Die Luftschwingung wird erzeugt, indem der Bläser die geschlossenen Lippen gegen das Mundstück preßt und nun durchbläst; die zuerst eindringende Luft bringt eine Verdichtung hervor; dadurch sucht sich die Luft auch nach rückwärts auszudehnen, drückt gegen die Lippen und schließt dieselben, so daß der Luftstrom nun unterbrochen ist; erst wenn die Luftverdichtung sich fortgepflanzt hat, kommt wieder Luft durch die Lippen u. s. f. Es geraten also auch die Lippen des Bläsers in schwingende Bewegung; die Luft im Rohre schwingt nun wie in einer offenen Röhre, indem sich ein, meistens jedoch mehrere freie Knoten bilden; die Lippen des Bläsers schwingen dabei gerade so rasch, als es ihnen die Schwingungen im Rohre gestatten, und es ist Sache des Bläsers, die Lippen gerade so stark anzudrücken und anzuspannen, daß sie diese Schwingungen genau und gut mitmachen können. Indem man das Rohr bald länger bald kürzer macht durch Ausziehen (Posaune) oder durch Klappen, bekommt man verschiedene Töne. Aber auch schon bei derselben Rohrlänge versteht es der Bläser, verschiedene Töne hervorzubringen, indem er durch Spannung der Lippen die Wellenlänge im Rohre beeinflußt, so daß sich mehr oder weniger Knoten bilden. So bildet er leicht zu jedem Ton die Oktave (zweimal mehr Knoten) oder wie bei den Signaltrompeten 4 oder 5 Töne, die in naher Verwandtschaft stehen, deren Schwingungszahlen sich etwa wie 2:3:4:5:6:8 verhalten, die also 2, 3, 4, 5, 6, 8 Knoten haben.

180. Das Mitschwingen.

Treffen die Luftschwingungen eines Tones eine gespannte Saite, welche genau auf denselben Ton gestimmt ist, so wird dadurch die Saite selbst in Schwingungen versetzt, sie *schwingt mit*.

Dies erklärt man sich folgendermaßen: Wenn die Tonwelle an der Saite ankommt, so wird diese durch den Druck der verdichteten Luft beiseite gedrückt; bei der folgenden Luftverdünnung schwingt sie zurück auch infolge ihrer eigenen Elastizität, und setzt nun die erhaltene Schwingung nach dem Trägheitsgesetze fort. Wenn nun die folgende Luftverdichtung gerade zu der Zeit kommt, in welcher die Saite wieder die Bewegung in der ersten Richtung macht, so wird diese Bewegung durch den Druck der verdichteten Luft verstärkt, und wenn dies jedesmal, bei jeder folgenden Luftverdichtung stattfindet, so wird die Saite jedesmal in ihrer Schwingung verstärkt, so daß sie bald in wahrnehmbare Schwingungen versetzt ist. Diese Verstärkung findet nur dann statt, wenn die Höhe des ankommenden Tones gleich ist dem Eigentone der Saite. Sind beide aber von einander verschieden, so wird es bald dahinkommen, daß die Saite, welche nach dem ersten Impulse infolge ihrer Spannung

schwingt, eine Bewegung macht, die der Wirkung der Luftwelle gerade entgegengesetzt ist; es wird also dann die schon vorhandene (noch kleine und unfühlbare) Bewegung der Saite wieder gehemmt und aufgehoben, die Saite kommt nicht in fühlbare Schwingungen, schwingt also nicht mit.

Leicht kann man dies Mitschwingen beobachten, wenn man gegen eine Geige oder ein Monochord hin einen Ton singt, auf den eine Saite gestimmt ist; oder wenn man bei einem Klavier den Ton einer aufgehobenen Taste ins Klavier singt; man hört nachher denselben Ton wieder aus dem Klavier nachklingen, und erkennt, daß die Saite, die auf diesen Ton gestimmt ist, in Schwingungen versetzt war. Von den anderen Saiten schwingen, wenn man ihre Dämpfer aufhebt, nur diejenigen, welche dadurch, daß sie sich in aliquote Teile teilen, den angesungenen Ton geben, und sie schwingen, indem sie sich in solche Teile teilen.

Das Mitschwingen ist ein lehrreiches Beispiel von der Kraftübertragung durch Wellenbewegung. Die Schwingungen des tönenden Körpers leisten Arbeit, indem sie die Luftwelle erzeugen. Die Luftwelle überträgt diese Arbeitsfähigkeit (Energie) an andere Orte und auf immer andere Massenteile; trifft sie nun einen Körper, der seiner Natur nach gerade diese Art der Bewegung machen kann, so überträgt sie diesem Körper die Bewegung, teilt ihm die Bewegung mit, versetzt ihn in Mitschwingungen, so daß der nun schwingende Körper die Kraft oder einen Teil der Kraft besitzt, welche der erste Körper zur Erregung der Wellen aufgewendet hat.

181. Die Resonatoren.

Wenn man eine tönende Stimmgabel über die Öffnung eines (ziemlich engen) cylindrischen Glasgefäßes hält, so kann man oft beobachten, daß die Luft im Glase selbst in Schwingungen gerät, welche den Ton der Gabel verstärken. Indem man durch Eingießen von Wasser die Höhe (Länge) des Gefäßes verkürzt, kann man ein solches Gefäß für einen bestimmten Ton passend machen. Dies ist der Fall, wenn die Luft im Gefäße schwingen kann wie in einer gedeckten Pfeife, wenn also die Länge des Gefäßes gleich $^1/_4$ Wellenlänge des erregenden Tones ist. Dann entsteht nämlich eine stehende Luftwelle in dem Gefäße, welche verstärkt wird durch die erregenden Wellen des tönenden Körpers und dadurch das Tönen, Mittönen der eingeschlossenen Luftmasse hervorbringt.

Bei manchen Glasgefäßen gelingt es, durch lautes Hineinrufen die Kraft der stehenden Welle derart zu steigern, daß das Gefäß zersprengt wird (Zerschreien von Gläsern).

Auf dem Mittönen eingeschlossener Luftmassen beruhen auch die Resonatoren. Es sind das trichterförmige, häufig jedoch

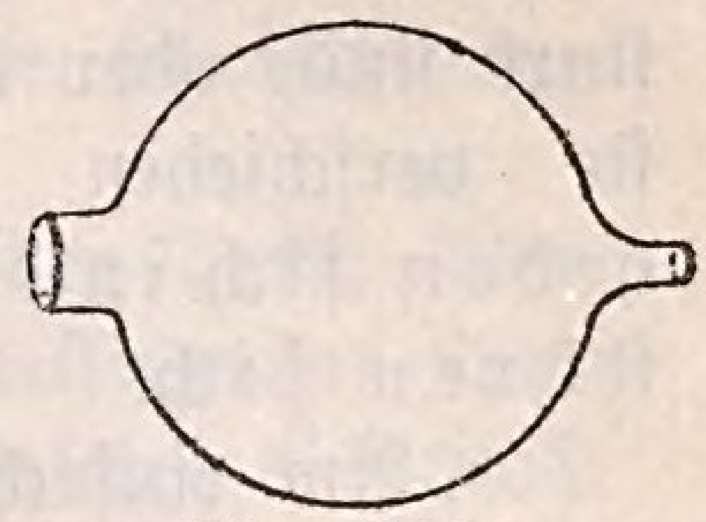


Fig. 228.

bauchige oder kugelige Gefäße aus Blech oder Glas, welche vorn eine weite Öffnung haben, welche dem ankommenden Tone entgegengehalten wird, und gegenüber eine kleine, gerade ins Ohr passende Öffnung, mit welcher sie dicht ans Ohr gehalten werden. Wenn nun ein Ton eindringt, der die Luftmasse des Resonators in Schwingungen zu versetzen vermag, für welchen also der Resonator seiner Größe nach paßt, für welchen er gestimmt ist, so verstärkt sich durch Mittönen der eingeschlossenen Luft der Ton und wird dadurch im Ohre deutlich vernehmbar. Dringt irgend ein anderer Ton ein, so kommt die Luft des Resonators nicht in Schwingungen, so daß man den Ton fast nicht hört.

Man macht sich eine Reihe solcher Resonatoren, deren jeder für einen anderen Ton gestimmt ist, und kann sie dann benützen, um die Obertöne eines Tones zu untersuchen, da das Ohr dieselben nur selten und nie alle getrennt wahrnimmt. Hält man aber den Resonator, der etwa auf den ersten Oberton (die Oktave) gestimmt ist, ans Ohr, so hört das Ohr den Grundton gar nicht mehr oder nur schwach, diesen Oberton aber, falls er vorhanden ist, verstärkt; so untersucht man den Ton dann für die folgenden Obertöne, indem man Resonatoren benützt, die für diese Obertöne abgestimmt sind.

Auf solche Weise ist es Helmholtz gelungen, die Klangfarbe zu analysieren, d. h. zu untersuchen, welcher Art und Stärke die Obertöne bei bestimmten Klängen sind, und nachzuweisen, daß die Verschiedenartigkeit der Klänge nur darin ihren Grund hat, daß dem Grundtone bestimmte Obertöne beigemischt sind. Umgekehrt gelang ihm auch die Synthese (Zusammensetzung) der Klänge; indem er nämlich einem Grundton, welcher keine Obertöne besitzt, gewisse Obertöne in entsprechender Stärke beimischte (z. B. durch gleichzeitiges Anstreichen entsprechender Stimmgabeln), gelang es ihm, Klänge von gewünschter Farbe nahezu herzustellen.

182. Interferenz der Schallwellen.

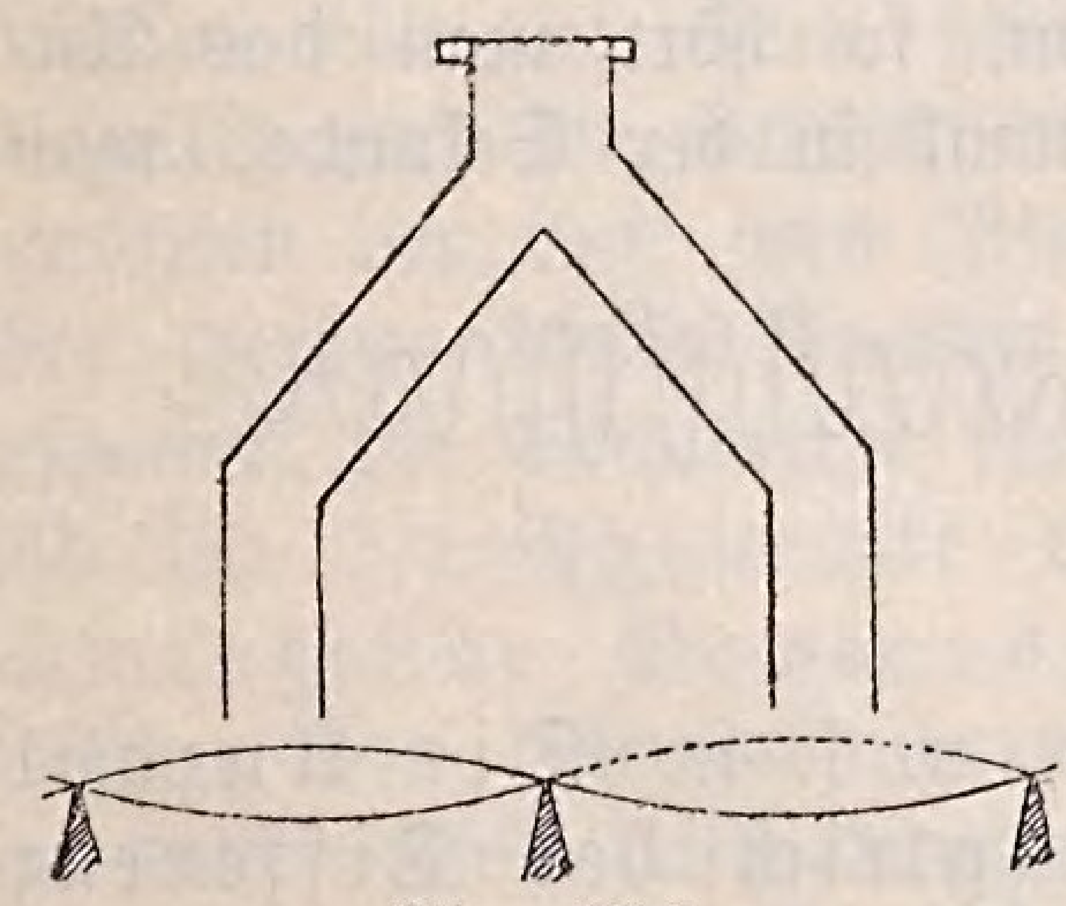


Fig. 229.

Da wir den Schall als wellenförmige Bewegung der Luft erkannt haben, so ist die Möglichkeit nicht ausgeschlossen, daß zwei solche wellenförmige Bewegungen, wenn sie von verschiedenen Orten her an demselben Punkte ankommen, sich gegenseitig aufheben, es ist ja hiezu nur notwendig, daß die zwei Wellen den Punkt zugleich nach entgegengesetzten Richtungen zu bewegen

versuchen; der Punkt bleibt in Ruhe, wenn beide Impulse gleich stark sind, oder er bewegt sich mit geringerer Geschwindigkeit, wenn sie verschieden sind. Man sagt dann: beide Wellen heben sich in diesem Punkte auf, interferieren sich, oder stören sich.

Am einfachsten beobachtet man die Interferenz an einem Rohre, das oben mit einer elastischen Membran überspannt ist und nach unten sich gabelt (Fig. 229). Hält man die unteren Enden über benachbarte Teile einer in aliquoten Teilen schwingenden Saite, die ja stets nach entgegengesetzten Richtungen schwingen, so heben sich die in die Röhren eindringenden Wellen derart auf, daß die Membran oben gar nicht schwingt, was man daran sieht, daß aufgestreute Sandkörner in Ruhe bleiben.

Wenn zwei Saiten oder zwei Orgelpfeifen nahezu auf denselben Ton gestimmt sind, so daß die eine nur um 1 oder 2 Schwingungen in der Sekunde mehr macht als die andere, so hört man nur einen Ton, aber man bemerkt ein gleichmäßiges Anschwellen und Nachlassen der Tonstärke, was man Schwebung nennt.

Nehmen wir an, die erste Saite schwinge langsamer, um eine Schwingung in der Seknnde, und es schwingen jetzt eben beide Saiten in derselben Richtung, so verstärken sich ihre Wellen, und man hört den Ton stark; aber die zweite Saite wird mit ihren Schwingungen vorauseilen, so daß nach einer halben Sekunde die Saiten gerade nach entgegengesetzten Richtungen schwingen; wenn also nun von der einen ein Wellenberg am Ohre anlangt, trifft von der andern eben ein Thal ein; beide schwächen sich, so daß man den Ton schwach hört, oder sie heben sich ganz auf, wenn beide Saiten gleich stark schwingen, so daß der Ton ganz verschwindet. Da die zweite Saite aber fortfährt, mit ihren Schwingungen vorauszueilen, so wird sie am Ende der Sekunde, wieder die Schwingungen in derselben Richtung machen wie die erste Saite, ihre Töne verstärken sich also wieder, und so geht es fort. Es entsteht also durch Interferenz dieser Wellen ein beständiges Anschwellen und Nachlassen der Tonstärke. Ist die Schwingungszahl der 2. Saite um 2 pro 1″ größer als die der ersten, so hört man das Anschwellen und Nachlassen des Tones zweimal in der Sekunde, man

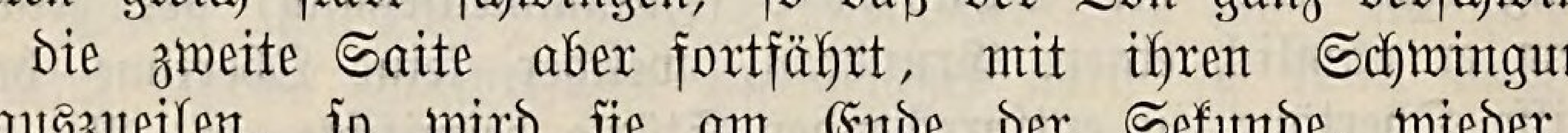


Fig. 230.

hört zwei Schwebungen in der Sekunde, u. s. f. Die Anzahl der Schwebungen in 1″ ist also gleich der Differenz der Schwingungszahlen in 1″. Die Figur 230 zeigt die

Bahn eines schwingenden Punktes, welcher von zwei Wellen à 13 resp. 14 Schwingungen getroffen wird, der also bei je 14 Schwingungen eine Schwebung macht.

Durch stärkeres Spannen der einen Saite oder durch Verschieben des Deckels der einen gedeckten Pfeife (Verstimmen) kann man leicht solche Schwebungen erzeugen. Wächst hiebei die Zahl der Schwebungen in 1″ über 12, so kann man sie nicht mehr gut einzeln wahrnehmen, es entsteht bei etwa 20 Schwebungen ein Schwirren, bei noch mehr der Eindruck einer schreienden Dissonanz.

Steigt die Anzahl der Schwebungen in 1″ über 48, so hört man nicht nur die beiden erzeugenden Töne getrennt, jeden für sich, sondern man hört *noch einen tieferen Ton, dessen Schwingungszahl eben dieser Anzahl der Schwebungen entspricht.* Da nämlich das Ohr nun von einer großen Anzahl Schwebungen getroffen wird, die in ihrem Anschwellen und Nachlassen ebenso regelmäßig verlaufen wie die Schwingungen eines Tones, so erzeugen diese Schwebungen selbst den Eindruck eines Tones, den man den *Differenzton* nennt. Dieselben sind leicht wahrzunehmen besonders an Orgelpfeifen; läßt man irgend einen Grundton, etwa c und die Quinte (g) zugleich tönen, so hört man zugleich die untere Oktave (C) des Grundtones (c) als Differenzton. Denn bei je 2 Schwingungen des c und den gleichzeitigen 3 Schwingungen des g entsteht 1 Schwebung, also ein Differenzton, der die untere Oktave des Grundtones ist, und als solcher gehört wird, wenn er nicht unterhalb der Grenze der wahrnehmbaren Töne liegt (48 in 1″). Ebenso gibt Grundton ($\bar{c} = 4$) und Terz ($\bar{e} = 5$) einen Differenzton (1), welcher die zweit-tiefere Oktave (C) des Grundtones ist. Grundton ($g = 6$) und Quart ($\bar{c} = 8$) geben als Differenzton (2) die untere Oktave der unter dem Grundton liegenden Quinte (C).

183. Die menschliche Sprache.

Der Ton der menschlichen Sprache wird hervorgebracht im Kehlkopfe, einem knorpeligen Ansatz am oberen Ende der Luftröhre. Er ist durch zwei elastische Membranen, die *Stimmbänder*, verschlossen bis auf einen schmalen Spalt, die *Stimmritze.* Gewöhnlich sind die Stimmbänder nicht gespannt, sondern schlaff und gewähren der Luft beim Atmen freien Durchgang. Beim Sprechen aber werden durch Muskeln des Kehlkopfes die Stimmbänder angespannt, die Stimmritze schließt sich bis auf einen schmalen Spalt und *die durchgehende Luft setzt die Stimmbänder in schwingende Bewegung.* Da nun dadurch die Öffnung zwischen den Stimmbändern bald größer bald kleiner wird, also die Luft selbst bald durchgehen kann, bald daran verhindert ist, *so kommt die Luft dadurch selbst in Schwingungen* und

erzeugt so den Ton. Durch zwei elastische Gummiplatten, welche man ähnlich über das Ende einer Glasröhre spannt, kann man solche Töne nachahmen; die Stimmbänder schwingen alternierend; je stärker sie gespannt werden, um so höher wird der Ton. Von vorn vom Kehlkopf bis zur freien Luft befindet sich noch die Rachenhöhle und die Mundhöhle und beide bilden ein eigentümlich geformtes Ansatzrohr, dem durch die verschiedene Lage der Zunge, Wangen, Zähne und Lippen die verschiedenartigste Form gegeben werden kann. Dies beeinflußt nicht die Tonhöhe, denn diese wird nur durch die Spannung der Stimmbänder hervorgebracht, wohl aber die Tonfarbe, den Klang des Tones, und bildet so die Sprache. Es bilden sich nämlich je nach dieser verschiedenartigen Mundstellung Obertöne, die nach Art, Höhe und Stärke verschieden sind, sich dem Grundton beimischen und so dessen Klang verändern. Zwei verschiedene Vokale, z. B. a und e, in derselben Tonhöhe gesprochen oder gesungen, unterscheiden sich nur durch die verschiedene Art, Höhe, Anzahl und Stärke der demselben Grundton beigemischten Obertöne. Bei manchen Vokalen ist es (Helmholtz) sogar gelungen, die wichtigsten dieser Obertöne zu finden. Überhaupt unterscheiden sich die gleich hohen Töne verschiedener Instrumente z. B. Geige, Flöte, Horn, Trompete u. s. w., die ja das Ohr als gleich hohe anerkennt, aber doch als verschieden klingende empfindet, nur durch die verschiedene Anzahl, Art und Stärke der Obertöne, die demselben Grundton beigemischt sind.

184. Das Ohr.

Das Ohr hat außen die Ohrmuschel, welche wie ein Hörrohr zum Auffangen der Schallschwingungen dient; sie setzt sich fort in den äußeren Gehörgang, der am Ende durch eine elastische Membran, das Trommelfell, geschlossen ist; da dasselbe stets gespannt ist, so wird es durch die Schwingungen der Luft in entsprechende Schwingungen versetzt. Hinter dem Trommelfell ist die Paukenhöhle, die mit Luft gefüllt ist und durch die Eustachische Röhre, die in die Rachenhöhle mündet, mit der äußern Luft in Verbindung steht. In der Paukenhöhle sind die vier Gehörknöchelchen: der Hammer ist mit dem Stiel am Trommelfell angewachsen und liegt mit dem dicken Ende auf dem Amboß; der Amboß ist mit einem Fortsatz am Kopfknochen (Felsenbein) angewachsen, berührt mit dem andern Ende das kleine Linsenbein und dies berührt den Steigbügel; letzterer ist mit seiner breiten Fläche am ovalen Fensterchen angewachsen; das ist eine Membran, welche in der Paukenhöhle dem Trommelfell gegenüberliegt und den Eingang bildet zum letzten Teile des Ohres, dem Labyrinthe. Durch die Gehörknöchelchen wird die Schwingung des Trommelfelles auf das ovale Fensterchen übertragen und gelangt so in das Labyrinth.

Das Labyrinth besteht aus mehreren Gängen im Knochen, ist mit einer wässrigen Flüssigkeit angefüllt, und in ihm verbreiten und verteilen sich die Fasern des vom Gehirn kommenden Gehörnerves. Im Labyrinth befinden sich erstens drei kreisförmige Bogengänge, deren Ebenen nahezu auf einander senkrecht stehen, und deren Bedeutung noch sehr wenig klar ist, und zweitens die Schnecke. Letztere ist ein schneckenförmiger Gang; in ihm befinden sich kleine Stächen (die Corti'schen Fasern), wie die Stufen einer Wendeltreppe neben und über einander liegend; die untersten sind die längsten und dicksten, nach oben werden sie immer kürzer und dünner; sie sind von Nervenfasern durchzogen. Man glaubt nun, daß diese Fasern für Schwingungen von verschiedener Schwingungszahl eingerichtet sind, so daß jede nur dann mitschwingt, wenn ein Ton ankommt, der dieselbe Schwingungszahl hat; dadurch wird dann das in dem Stäbchen liegende Nervenende gereizt und so der Ton empfunden.

Da nun die meisten Töne nicht einfache Töne, sondern mit Obertönen vermischt sind, so muß man annehmen, daß bei einem solchen zusammengesetzten Tone nicht bloß diejenigen Fasern mitschwingen, welche dem Grundtone entsprechen, sondern auch diejenigen, welche den vorhandenen Obertönen entsprechen. Daß das möglich ist, ersieht man, wenn man in ein Klavier, dessen Dämpfung entfernt ist, einen Vokal a, oder e, singt; man hört dann nicht bloß einen Ton von gleicher Höhe aus dem Klavier wiederklingen, sondern der Ton hat die Klangfarbe des Vokales a oder e; man hört also ein a oder e aus dem Klavier nachklingen. Da nun die Klangfarbe des Vokales a dadurch entsteht, daß dem Grundtone gewisse Obertöne in gewisser Stärke beigemischt sind, so muß man annehmen, daß im Klavier auch alle die Saiten mitschwingen, welche den vorhandenen Obertönen entsprechen. Ebenso schwingen von den Gehörfasern in der Schnecke auch alle diejenigen mit, welche den vorhandenen Obertönen entsprechen. Da die Anzahl der Corti'schen Fasern sehr groß ist, ca. 3000, so ist die Möglichkeit vorhanden, daß bei dem bekannten Umfange der wahrnehmbaren Töne (ca. 10 Octaven = 120 halbe Töne) jeder Ton mit all seinen Obertönen durch Mitschwingen von entsprechenden Fasern im Ohre nachgebildet und so empfunden wird.

Wenn unser Ohr eine große Anzahl verschiedener Töne, etwa eine Orchestermusik aufnimmt, so gelangt nur die Resultierende all dieser Wellenbewegungen durch die Gehörknöchelchen in's Labyrinth. Daß dort die Resultierende wieder in ihre einzelnen Komponenten, die einzelnen Töne, zerlegt wird, ja daß jeder solche Ton selbst wieder in seine Obertöne zerlegt, einzeln von den Corti'schen Fasern aufgenommen und doch wieder vereinigt dem Bewußtsein zugeführt wird, daß wir nach Klang, Höhe, Stärke und auch nach Richtung jeden einzelnen Ton wahrnehmen, daß wir von zwei Sängern, welche

denselben Ton singen, jedes einzelnen Stimme erkennen: all das würde wohl auch dann noch unser höchstes Staunen erregen, wenn wir genauer wüßten, wie es dabei zugeht.

Zehnter Abschnitt.

Optik.

185. Wesen des Lichtes.

Licht ist eine von einem Körper ausgehende Thätigkeit, welche, wenn sie in unser Auge gelangt, die Empfindung des Sehens hervorbringt. Man nahm früher an, von dem leuchtenden Körper werde ein ungemein feiner Stoff ausgesandt, Lichtstoff, der nach allen Richtungen hin gradlinig weiterfliegt und so auch in unser Auge kommt. Man nannte diese Annahme die Emissionstheorie, und insbesondere Newton bildete sie (1669) sehr vollkommen aus, so daß es ihm gelang, durch sie alle damals bekannten Erscheinungen zu erklären.

Man fand aber später noch einige Erscheinungen, welche sich durch die Emissionstheorie nicht erklären ließen, und stellte deshalb eine neue Theorie auf, die Undulationstheorie, Wellen- oder Schwingungstheorie. Sie wurde zuerst von Huyghens aufgestellt 1678, doch fand sie keine Beachtung und wurde von Newtons Emissionstheorie zurückgedrängt. Thomas Young (1802) und Fresnel stellten sie wieder auf. Man nimmt an: Das ganze Weltall, jeder Raum desselben, ist angefüllt mit einem äußerst feinen Stoffe, dem Äther; dieser hat kein wahrnehmbares Gewicht, ist so fein, daß er jeden Körper durchdringt, so daß auch zwischen den Molekülen des Glases, Wassers ꝛc. Ätherteilchen, Ätheratome sind. Der Äther ist elastisch, ähnlich wie die Luft; wenn also ein Ätherteilchen seine Stelle verläßt, so wirkt es ziehend und drückend auf die benachbarten, so daß diese auch in Bewegung kommen, und nun ihrerseits wieder ebenso auf ihre Nachbarn einwirken, so daß die Bewegung eines Ätherteilchens sich auf sämtliche vorhandenen Ätherteilchen fortpflanzt. Man nimmt nun an: **Das Licht besteht in einer wellenförmigen Bewegung des Äthers:** Ein leuchtender Körper ist im stande, die Ätherteilchen in eine schwingende Bewegung zu versetzen, und diese Bewegung pflanzt sich nach allen Richtungen hin in geraden Linien auf alle andern Ätherteilchen fort. Eine in Schwingungen befindliche Reihe von Ätherteilchen

oder auch ein ganzes Bündel paralleler Ätherreihen nennt man einen Lichtstrahl.

Die Bewegung der Ätherteile ist nicht eine longitudinale wie die Bewegung der Luftteile beim Schalle, sondern eine transversale: die Ätherteile schwingen senkrecht zur Richtung des Lichtstrahles.

186. Durchsichtigkeit.

Das Licht pflanzt sich in gerader Linie fort. Trifft es hiebei auf einen Körper, so kann zweierlei eintreten: Entweder es durchdringt den Körper, dann nennen wir ihn durchsichtig, wie Luft, Wasser, Glas, Diamant ꝛc.; oder es ist nicht im stande, den Körper zu durchdringen; dann nennen wir den Körper undurchsichtig (opak), wie die Metalle, Steine, Holz ꝛc.

Es gibt weder einen vollständig durchsichtigen, noch einen vollständig undurchsichtigen Körper; denn auch die klarsten und durchsichtigsten Körper lassen nicht alles Licht durchdringen, sondern verschlucken, vernichten (absorbieren) immer mehr Licht, je tiefer es eindringt. Meerwasser ist stellenweise so klar, daß man in 100 *m* Tiefe noch jeden Stein sehen kann; aber in Tiefen von über 3—400 *m* dringt kein Sonnenlicht mehr. Ebenso gibt es aber auch keinen vollständig undurchsichtigen Körper, sondern jeder läßt das Licht wenigstens in geringe Tiefen eindringen. Gold läßt, zu einem sehr dünnen Blättchen ausgeschlagen, wenigstens etwas (grünliches) Licht hindurch (Robert Boyle). Körper, die bei mäßiger Dicke etwas Licht durchdringen lassen, nennt man durchscheinend (transparent); solche sind: Fett, Wachs, Alabaster, weißer Marmor, Milchglas, Achat ꝛc. Bei sehr geringer Dicke sind solche Körper fast ganz durchsichtig, bei großer Dicke undurchsichtig.

Auf der geradlinigen Fortpflanzung des Lichtes beruht die hübsche Erscheinung in einer Dunkelkammer, einem Zimmer, das man ganz verfinstert hat. Bringt man in einem Fensterladen eine kleine (*mm*) weite Öffnung an, so dringen die von den außenliegenden Gegenständen ausgehenden Lichtstrahlen in das Zimmer, treffen dort einen Papierschirm oder die gegenüberstehende Wand und erzeugen so ein Bild der äußeren Gegenstände. Das Bild ist verkehrt, sehr lichtschwach, aber sehr deutlich. Durch Vergrößerung der Öffnung wird das Bild lichtstärker, aber undeutlicher. Sonnenstrahlen, die zwischen den Blättern eines Baumes zu Boden fallen, erzeugen dort kreisrunde oder rundlich begrenzte Bilder; bei einer Sonnenfinsternis dagegen Bilder, die der Form der verfinsterten Sonne entsprechen.

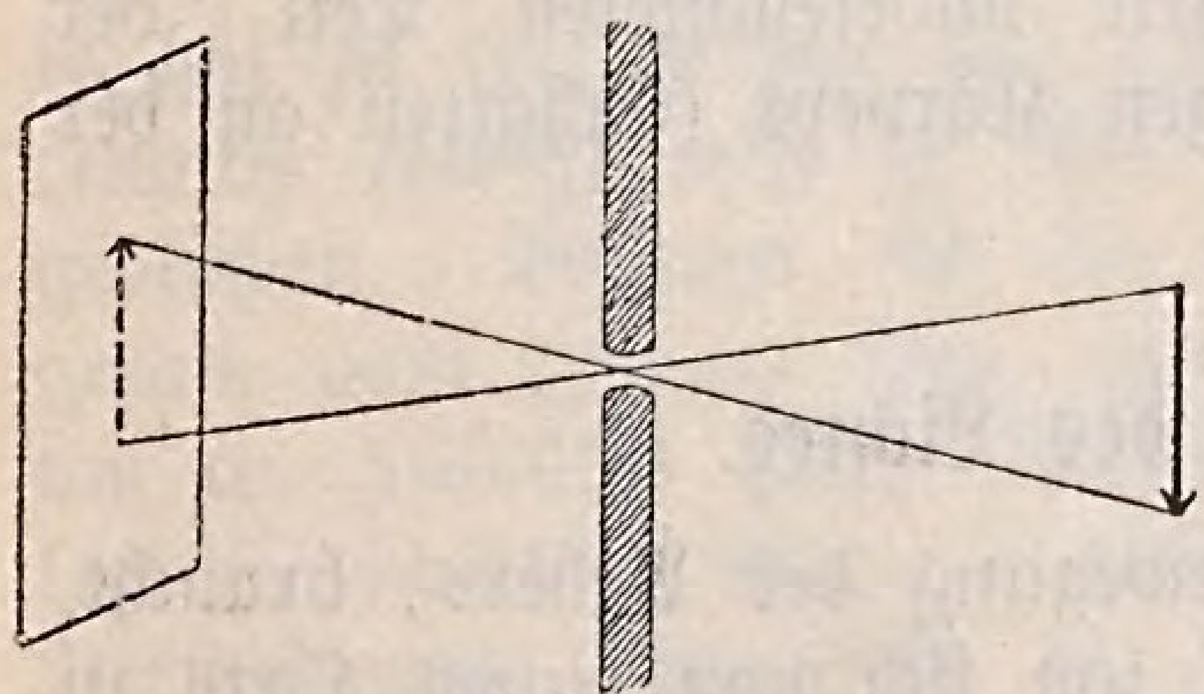


Fig. 231.

187. Schatten.

Wegen der geradlinigen Fortpflanzung des Lichtes erhält der Raum hinter einem undurchsichtigen Körper kein Licht vom leuchtenden Körper; dieser lichtleere Raum heißt der Schatten. So befinden wir uns nachts im Erdschatten, d. h. in dem Raume, in welchen das Sonnenlicht nicht kommen kann, weil es von der undurchsichtigen Erde aufgefangen wird; bei einer Mondsfinsternis tritt der Mond in den Erdschatten, bei einer Sonnenfinsternis befinden wir uns im Mondschatten.

Ist der leuchtende Körper ein Punkt, so hat der Schatten die Form eines Kegels, der vom undurchsichtigen Körper nach rückwärts sich immer mehr erweitert (Schattenkegel). Hat aber der leuchtende Körper eine größere Ausdehnung, so gibt der undurchsichtige Körper nicht bloß einen Kernschatten, d. i. einen Raum, in welchen gar kein Licht vom leuchtenden Körper eindringt, sondern auch einen Halbschatten, d. i. einen Raum, in welchen nur ein Teil des Lichtes des leuchtenden Körpers eindringt.

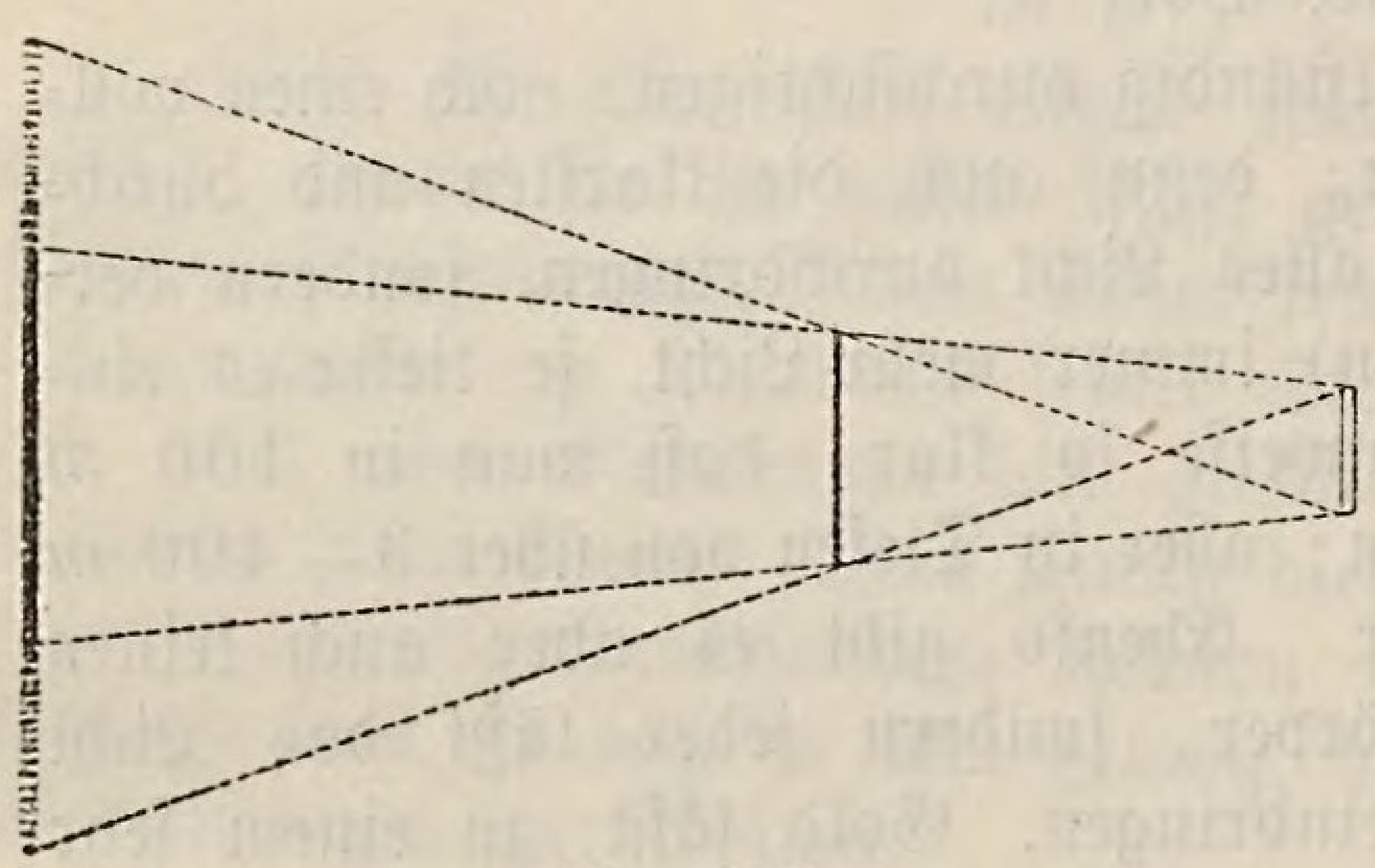


Fig. 232.

So gibt die Erde, von der Sonne beschienen, einen Kernschatten, der in eine Spitze ausläuft, also kegelförmig ist (weil ja die Erde kleiner ist als die Sonne), und einen diesen Kernschatten umgebenden Halbschatten, der außen noch am meisten Licht enthält und um so dunkler, tiefer wird, je mehr man sich dem Kernschatten nähert. Bei einer Mondsfinsternis zeigt der Erdschatten auf dem Monde keine scharfe Grenze, sondern einen verwaschenen Rand, den Halbschatten.

Wenn das Licht auf eine Wand fällt, und zwischen dem leuchtenden Punkte und der Wand ein undurchsichtiger Körper sich befindet, so liegt ein Teil der Wand im Schatten und erhält kein Licht; man nennt dann auch diesen unbeleuchteten Teil der Wand den Schatten des undurchsichtigen Körpers (Schatten an der Wand).

188. Geschwindigkeit des Lichtes.

Das Licht, die wellenförmige Bewegung des Äthers, braucht, wie jede Bewegung, eine gewisse Zeit, um sich von einem Orte zu einem andern fortzupflanzen. Diese Zeit ist, so lange bloß irdische Erscheinungen berücksichtigt werden, so kurz, daß man sie für ge-

wöhnlich vernachlässigen kann; man kann also sagen, in demselben Momente, in welchem der Blitz in der Wolke aufleuchtet, sehen wir ihn schon; oder den Blitz der Kanone sieht man im Moment des Abfeuerns, gleichgültig, wie weit man von ihr entfernt ist ꝛc.

Die Geschwindigkeit des Lichtes wurde zuerst gemessen durch *Olaf Römer*, einen dänischen Astronomen, und zwar durch Beobachtung der *Verfinsterung der Jupitertrabanten* (1676). Der Planet Jupiter wird nämlich von 4 Monden umkreist, vom innersten sehr rasch, in $42^1/_2$ Stunden. Da der Jupiter ein sehr großer Planet ist, und die Ebene der Mondbahn nahezu mit der Ebene der Jupiterbahn zusammenfällt, so kommt der innerste Mond bei jedem Umlaufe in den Schatten des Jupiter, wird also verfinstert. Eintritt und Austritt dieser Verfinsterung können von der Erde aus leicht beobachtet werden. Die Zeit zwischen dem Beginne einer Verfinsterung und dem Beginne der nächsten ist offenbar gleich der (synodischen) Umlaufszeit des Trabanten, und sollte demnach stets dieselbe sein. Nun fand O. Römer: Wenn die Erde in Konjunktion oder Opposition mit dem Jupiter, also in E oder E_2 steht,

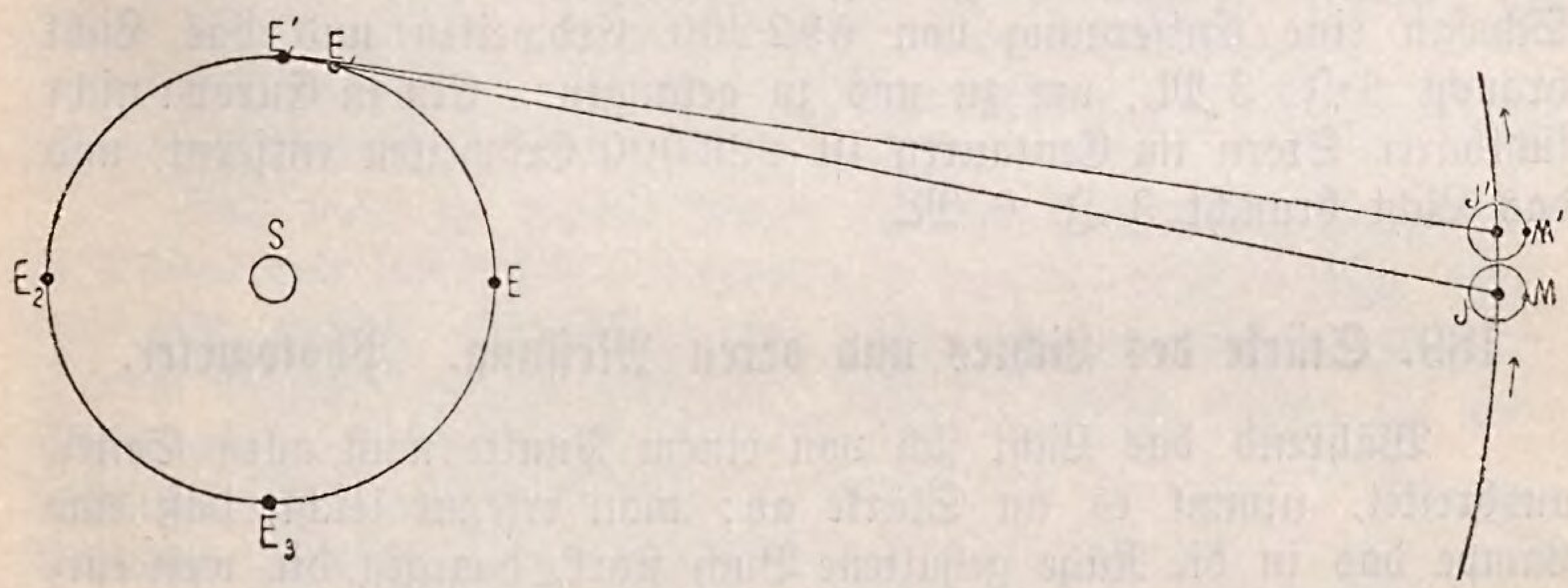


Fig. 233.

so beträgt diese Zeit $42^1/_2$ Stunden (ca.), befindet sich aber Jupiter im Quadranten, also die Erde in E_1 oder E_2, so ist diese Zeit um 14 Sekunden länger oder kürzer, je nachdem sich die Erde vom Jupiter weg oder auf ihn zu bewegt. Römer fand auch die Erklärung hiefür: Wenn nämlich die Erde sich in E oder E_2 befindet, so hat sie sich in den $42^1/_2$ Stunden nahezu parallel zum Laufe des Jupiter bewegt, also ist ihre Entfernung von ihm nahezu dieselbe geblieben. Befindet sich die Erde aber in E_1, so bewegt sie sich gerade vom Jupiter weg, entfernt sich also in den $42^1/_2$ Stunden um ca. 590 000 geogr. Meilen von ihm; denn eine solche Strecke legt sie in $42^1/_2$ Stunden zurück. Da nun beim Beginne der zweiten Verfinsterung das Licht die Erde nicht mehr an demselben Orte, sondern an einem um 590 000 geographische Meilen weiter entfernten Orte trifft, so braucht es noch eine gewisse Zeit, um diese 590 000

geographische Meilen zurückzulegen, und um soviel erscheint der Eintritt der zweiten Verfinsterung verzögert. Diese Verzögerung beträgt 14″, also legt das Licht in 14 Sekunden 590 000 geographische Meilen zurück, also in 1″ 42 100 geographische Meilen. Daß in E_3, wo sich die Erde gerade auf den Jupiter zu bewegt, die Verfinsterung um 14″ verfrüht erscheint, erklärt sich ähnlich.

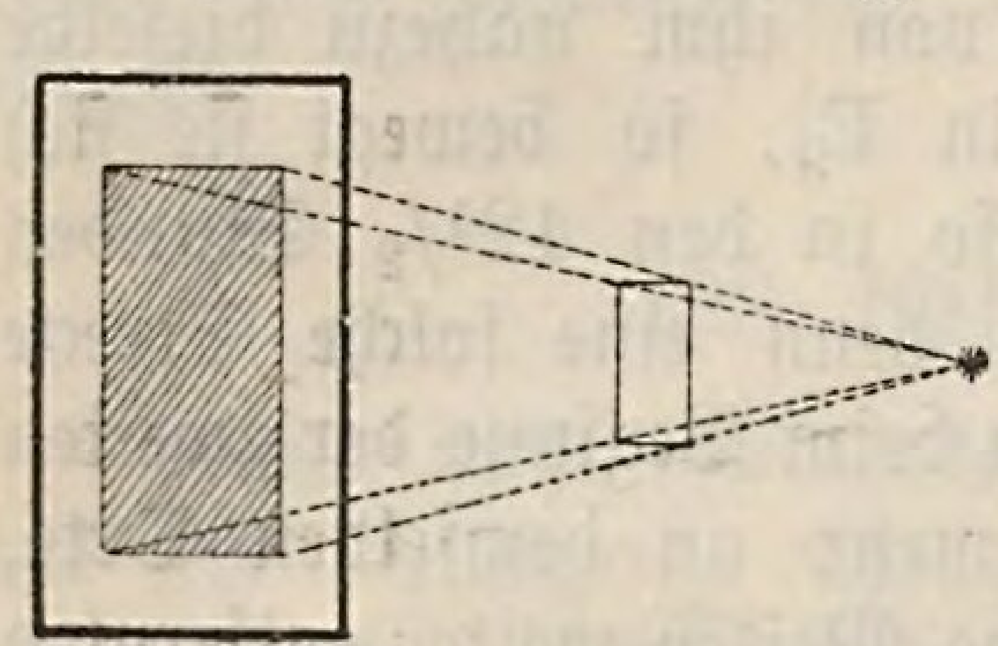
Dem französischen Physiker Fizeau gelang es, die Geschwindigkeit des Lichtes zu messen, durch Verwendung von verhältnismäßig kurzen irdischen Entfernungen. Er fand eine Geschwindigkeit von 315364 *km* pro 1″.

Die Geschwindigkeit des Lichtes ist also eine enorm große, so daß irdische Entfernungen stets in ungemein kleinen Zeiten durchlaufen werden. Um aber die großen Entfernungen des Weltraumes zu durchlaufen, braucht das Licht auch eine entsprechend große Zeit. So braucht das Licht von der Sonne zur Erde 8′ 11″, und bis zum äußersten Planeten Neptun 4 St. 19 M.; wir sehen also die Vorgänge auf der Sonne um 8′ 11″ später, als sie wirklich eintreten. Ungemein weit sind die Fixsterne entfernt; doch hat man bei einigen die Entfernung messen können; so hat ein Stern im Schwan eine Entfernung von 592 200 Erdweiten und das Licht braucht 9 J. 3 M., um zu uns zu gelangen. Ein in Europa nicht sichtbarer Stern im Centauren ist 223 000 Erdweiten entfernt, und das Licht braucht 3 J. 6 M.

189. Stärke des Lichtes und deren Messung. Photometer.

Während das Licht sich von einem Punkte nach allen Seiten ausbreitet, nimmt es an Stärke ab; man erkennt leicht, daß eine Lampe das in die Nähe gehaltene Buch stark, dagegen die weit entfernte Wand schwach beleuchtet.

Hält man ein Blatt Papier vor die Lampe (Fig. 234), so erhält es eine gewisse Menge Licht. Es erzeugt aber auch auf der Wand einen Schatten. Entferne ich nun das Papier, so trifft das Licht die Wand und beleuchtet nun die ganze Fläche, welche zuerst der Schatten einnahm. Da nun aber die Fläche des Schattens viel größer ist als die Fläche des Schirmes, so folgt, daß die Fläche des Schattens viel weniger beleuchtet wird als der nähere Schirm.


Fig. 234.

Ist die zweite Fläche (Wand) parallel der ersten (Schirm), so ist die zweite Fläche so vielmal größer als die erste, als das Quadrat ihres Abstandes vom Lichte größer ist als das Quadrat des Abstandes der ersten Fläche vom Lichte. Daraus folgt, daß auf ihr das Licht ebensovielmal schwächer ist. Ist also

die zweite Fläche 2, 3, 4 mal weiter entfernt als die erste, so bekommt 1 *qcm* der zweiten Fläche 4, 9, 16 mal weniger Licht als ein *qcm* der ersten Fläche. Man sagt deshalb: **die Lichtstärke nimmt ab, wie das Quadrat der Entfernung zunimmt,** oder **die Lichtstärke ist umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung.**

Das Sonnenlicht ist auf dem Mars 2,3 mal, auf dem Jupiter 27 mal, Saturn ca. 90 mal, Uranus ca. 400 mal und auf dem Neptun ca. 900 mal schwächer als bei uns, dagegen auf der Venus 1,9 mal, auf dem Merkur zwischen 4,6 und 10,6 mal stärker.

Daß wir ein Gaslicht in einer Entfernung von $^1/_2$ *m* ohne Schaden und in der Entfernung von 10 *km* (bei reiner Luft noch viel weiter) also bei 400 000 000 mal geringerer Stärke noch sehen können, zeugt von der vorzüglichen Einrichtung unseres Auges.

Soll eine Fläche von zwei verschiedenen Flammen, die sich in verschiedenen Entfernungen befinden, gleich stark erleuchtet werden, so ergibt sich leicht, daß die Lichtstärken sich verhalten müssen wie die Quadrate ihrer Entfernungen von der beleuchteten Fläche; die 2 mal weiter entfernte Flamme muß 4 mal stärker sein.

Photometrie ist die Vergleichung und Messung der Lichtstärke zweier Lichtquellen.

Will man die Stärke zweier irdischen Lichtquellen vergleichen, so bedient man sich des Photometers von Rumford (Fig. 235), das sehr einfach eingerichtet ist. Vor einem weißen (Papier)-Schirm befindet sich ein Holzstab, und vor diesen werden die zwei Flammen so gestellt, daß die Schatten des Stabes auf dem Schirme ziemlich nahe beisammen stehen. Man verrückt die eine Flamme so lange, bis beide Schatten gleich dunkel erscheinen. Es wird dann der Schatten, den A entwirft, von B beleuchtet, und ebenso wird der des B von A beleuchtet.

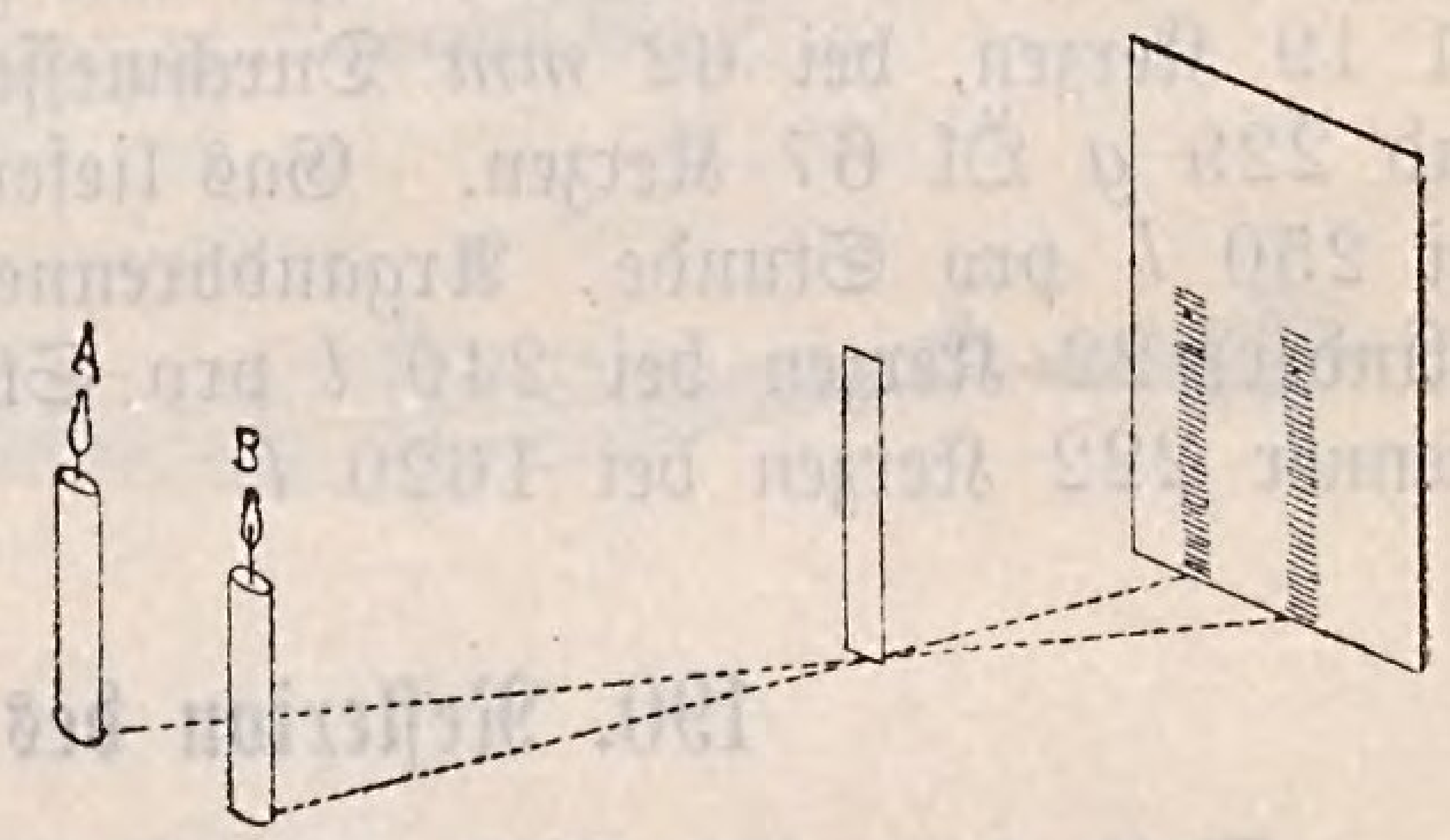


Fig. 235.

Erscheinen beide Schatten gleich hell, so sind die Beleuchtungen von A und B gleich stark, also verhalten sich die Lichtstärken der Quellen A und B wie die Quadrate der Abstände beider Flammen vom Schirme. Ist A 37 *cm*, B 50 *cm* vom Schirme entfernt, so ist $A : B = 37^2 : 50^2 = 1369 : 2500$; B ist also nicht ganz zweimal heller als A.

Besser ist das Photometer von Bunsen. Auf einem Schirm von Seidenpapier ist ein Stearinfleck angebracht, so daß der Schirm dort durchscheinend ist. Bringt man hinter dem Schirm (in einem sonst dunklen Zimmer) ein Licht an, so erscheint der Stearinfleck

hell auf dunklem Grunde. Nähert man nun dem Schirm von vorn ein Licht A, so sieht man bei einer bestimmten Annäherung den Stearinfleck verschwinden, wenn nämlich die vordere Fläche des Schirmes durch A ebensoviel Licht erhält als durch den Stearinfleck vom hinteren Lichte her durchdringt. Bei zu großer Annäherung des A erscheint der Stearinfleck wieder, aber dunkel auf hellem Grunde. Entfernt man A, und nähert ein anderes Licht B von vorn, bis wieder der Stearinfleck verschwindet, so erhält nun der Schirm von B ebensoviel Licht als vorher von A. Mißt man die Entfernungen des A und B vom Schirme, etwa 49 und 71 *cm*, so verhalten sich die Lichtstärken wie die Quadrate dieser Abstände, also $A : B = 49^2 : 71^2 = 2401 : 5041$, also B ist etwas mehr als doppelt so hell als A.

Zur Messung der Lichtstärken hat man sich Lichtstärkeeinheiten gemacht, von denen folgende die gebräuchlichsten sind: 1) Die absolute Lichtstärkeeinheit: 1 *qcm* Oberfläche geschmolzenen Platins bei der Erstarrungstemperatur, 1775° C. 2) Der Carcel-Brenner: Lampe von 30 *mm* Dochtbreite und 40 *mm* Flammenhöhe, welche in 1 Stunde 42 *g* Kolzaöl verbraucht. 3) Deutsche Vereinskerze: Paraffinkerze von 22 *mm* Durchmesser, 30 *mm* Flammenhöhe. 4) London Standard Spermaceti Candle: Walratkerze von 45 *mm* Flammenhöhe, welche in 1 Stunde 7,7 *g* verbrennt. Es ist 1 abs. Einh. = 2,08 Carcel = 15,83 Deutsche V.-K. = 15,48 Stand. Sp. C. Es liefert ein Petroleumrundbrenner von 25 *mm* Durchmesser bei 54 *g* Öl pro Stunde 16 Kerzen; bei 30 *mm* Durchmesser und zentralem Scheibchen bei 63 *g* Öl 19 Kerzen, bei 62 *mm* Durchmesser und zentralem Scheibchen und 229 *g* Öl 67 Kerzen. Gas liefert: Schnittbrenner 17 Kerzen bei 250 *l* pro Stunde, Argandbrenner (Rundbrenner mit Glascylinder) 22 Kerzen bei 240 *l* pro Stunde, Siemens Regenerativbrenner 222 Kerzen bei 1620 *l*.

190. Reflexion des Lichtes.

Stets wenn das Licht auf die Grenzfläche zweier Stoffe (Medien) trifft, teilt es sich in zwei Teile; der eine Teil dringt in das zweite Medium ein (und wird entweder durchgelassen oder verschluckt, wovon später), der andere Teil kehrt in das erste Medium zurück, wird zurückgeworfen oder reflektiert. Licht wird von einer Metallfläche (Grenzfläche zwischen Luft und Metall) oder Wasser- oder Glasfläche u. s. w. zurückgeworfen.

Ist diese Grenzfläche rauh, voll kleiner, unregelmäßiger Unebenheiten, wie bei Holz, Stein, Erde, Papier, rauhem Metalle, mattgeschliffenem Glase, einer Wolke u. s. w., so wird das auffallende Licht nach allen Seiten hin zurückgeworfen, gleichgültig, wie

es einfällt. Man nennt dies eine zerstreute Zurückwerfung oder diffuse Reflexion. Sie bewirkt, daß wir solche Gegenstände überhaupt sehen; denn die von einer oder mehreren Seiten auf solche Gegenstände fallenden Lichtstrahlen werden nach allen Seiten hin zurückgeworfen und kommen so in unser Auge, wo es sich auch befinden mag, so daß wir von überall her den Gegenstand, d. h. das von ihm zurückgeworfene Licht sehen. Wir nennen dabei einen Gegenstand hell, wenn er verhältnismäßig viele Lichtstrahlen zurückwirft (weißes Papier, Kreide, helle Kleider, hellgrüne, junge Blätter, lichte Blumen u. s. w.), dagegen dunkel, wenn er sehr wenig Licht zurückwirft (braune Stoffe, Erde u. s. w.) und schwarz, wenn derselbe fast gar kein Licht zurückwirft. Einen absolut schwarzen Körper, der gar kein Licht zurückwirft, gibt es nicht; ein solcher müßte auch bei der stärksten Beleuchtung ganz unsichtbar sein, da er gar kein Licht in unser Auge zurückwirft; sehr schwarze Körper sind Tusch und Lampenruß.

191. Definition des optischen Bildes.

Das Auge sieht einen Punkt, wenn von den Lichtstrahlen, die von dem Punkte ausgehen, ein (kegelförmiges) Bündel ins Auge fällt.

Wenn nun sämtliche Strahlen eines solchen Bündels durch irgend welche Ursachen auf ihrem Wege von ihrer Bahn abgelenkt

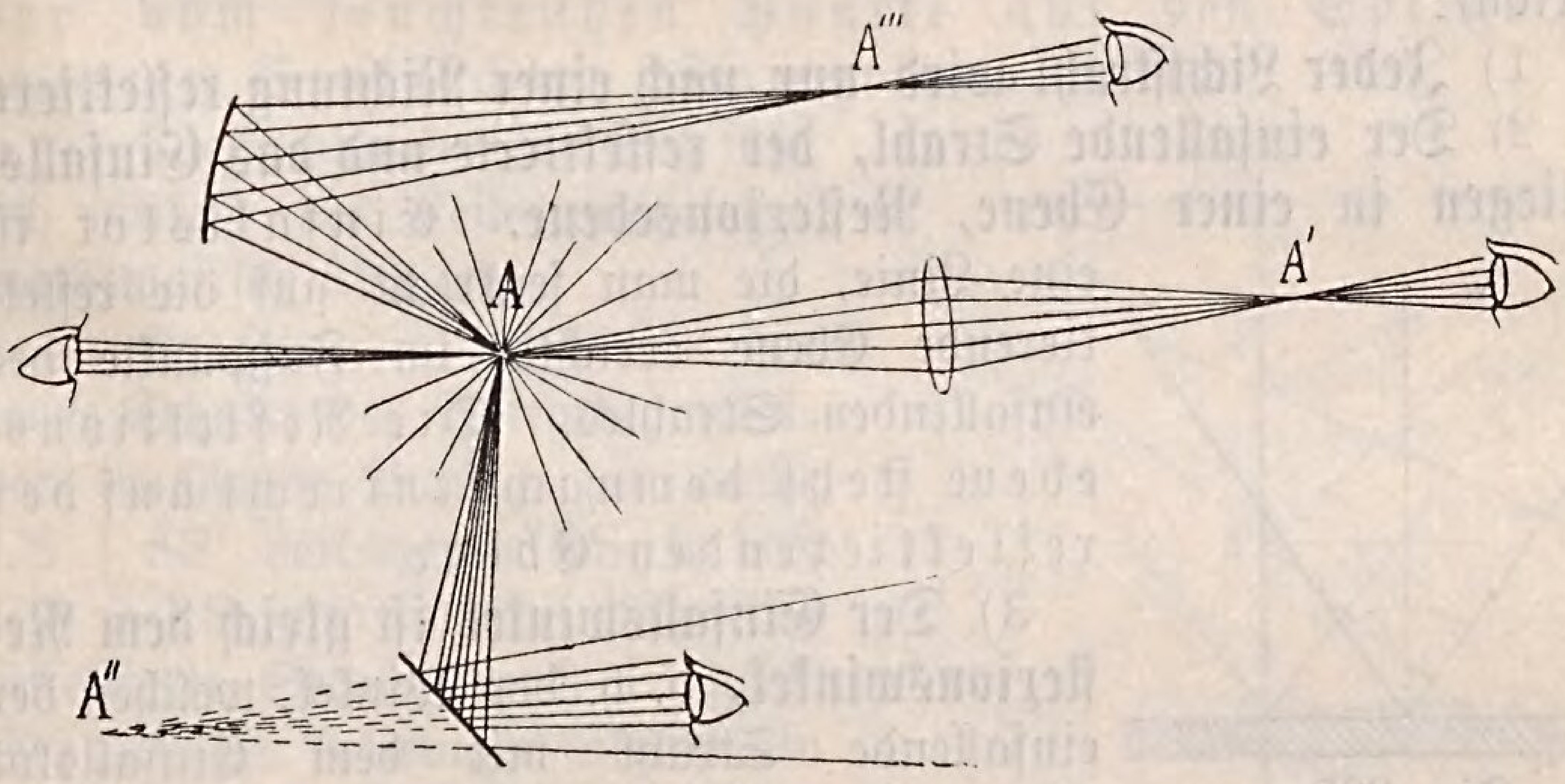


Fig. 236.

werden, so daß sie nachher wieder in einem Punkte A' oder A''' (Fig. 236) zusammentreffen, so nennt man diesen Punkt A' oder A''' ein optisches Bild des Punktes A. Die Lichtstrahlen setzen, nachdem sie in diesem Punkte zusammengekommen sind, ihren geradlinigen Weg fort und bilden wieder ein kegelförmiges Strahlenbündel; stellt sich nun das Auge in den Gang dieser Lichtstrahlen,

so hat es denselben Eindruck, wie wenn es von dem von einem leuchtenden Punkte ausgehenden Strahlenbündel getroffen würde; das Auge glaubt also, in A′ den leuchtenden Punkt zu sehen. Deshalb nennt man A′ das Bild von A, und zwar ein reelles Bild; ebenso A‴.

Werden jedoch sämtliche Strahlen eines solchen Bündels durch irgend welche Ursache von ihrer Bahn so abgelenkt, daß sie sich nicht wirklich in einem Punkte schneiden, aber doch so laufen, als wenn sie alle von einem Punkte A″ herkämen, so nennt man auch diesen Punkt A″ ein Bild von A, aber ein virtuelles Bild. Wird nämlich ein Auge in den Gang dieser Lichtstrahlen gebracht, so hat es den Eindruck, als wenn die Strahlen wirklich von A″ herkämen, es glaubt, in A″ den leuchtenden Punkt A zu sehen; deshalb nennt man A″ auch ein Bild von A, und zwar, da die Lichtstrahlen nicht wirklich von A″ herkommen, ein virtuelles Bild.

Werden aber die Strahlen eines solchen Bündels so abgelenkt, daß sie nach der Ablenkung keinen solchen Vereinigungsort (weder einen reellen, noch virtuellen) haben, so hat das Auge, das man in den Gang solcher Lichtstrahlen bringt, wohl noch den Eindruck von Licht, Helligkeit, Farbe, aber nicht mehr den Eindruck, als sehe es den Punkt A. Es entsteht kein optisches Bild.

192. Reflexionsgesetze.

Ist die Grenzfläche zweier Medien glatt, so erfolgt die Reflexion nach bestimmten Gesetzen, den Reflexionsgesetzen (regelmäßige Reflexion):

1) **Jeder Lichtstrahl wird nur nach einer Richtung reflektiert.**

2) **Der einfallende Strahl, der reflektierte und das Einfallslot liegen in einer Ebene, Reflexionsebene.** Einfallslot ist eine Linie, die man senkrecht auf die reflektierende Ebene errichtet im Fußpunkte des einfallenden Strahles. Die Reflektionsebene steht demnach senkrecht auf der reflektierenden Ebene.

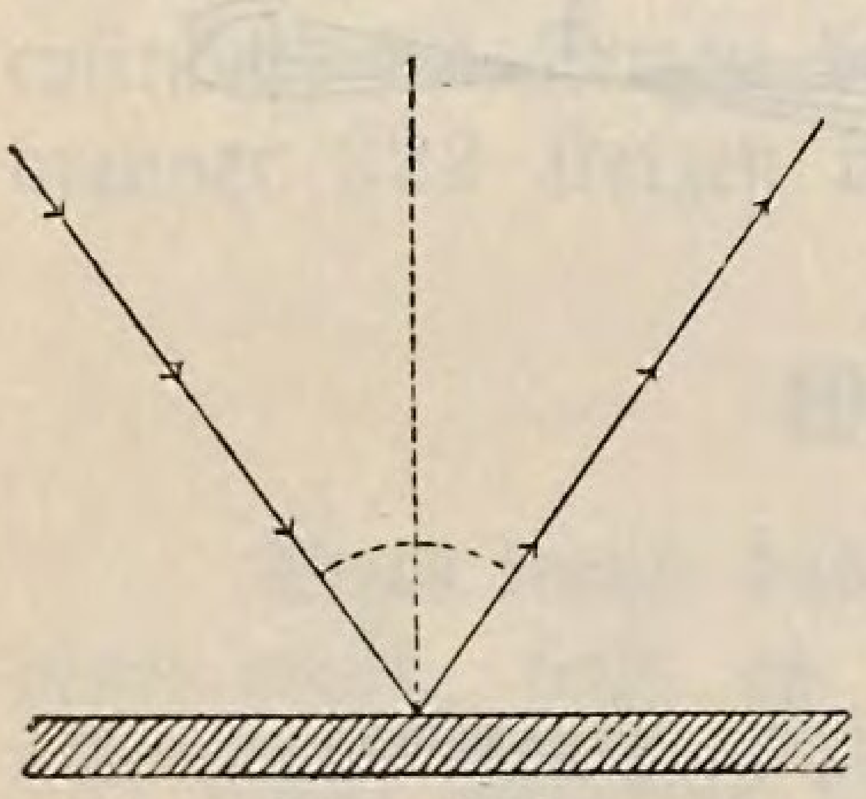


Fig. 237.

3) **Der Einfallswinkel ist gleich dem Reflexionswinkel,** d. h. der Winkel, welchen der einfallende Strahl mit dem Einfallslot bildet, ist gleich dem Winkel, welchen der reflektierte Strahl mit dem Einfallslot bildet.

Zum Beweis dient der Reflexionsapparat: Auf einem Brettchen ist ein im Halbkreise gebogenes Blech befestigt, in Grade geteilt und in der Mitte des Halbkreises mit einem feinen Spalte versehen. Im Mittelpunkte des Kreises (Fig. 238) ist ein kleiner Spiegel drehbar aufgestellt und mit einem Zeiger verbunden, welcher auf ihm senkrecht steht,

also die Spiegelnormale oder das Einfallslot darstellt, und mit seinem Ende längs des Halbkreises sich bewegt. Läßt man nun durch den Spalt einen Lichtstrahl auf den Spiegel fallen, dreht diesen etwas, so daß der Zeiger etwa auf 32^0 zeigt, also der Einfallswinkel 32^0 beträgt, so wird das Licht reflektiert und trifft den Halbkreis bei 64^0; man sieht daraus, daß auch der reflektierte Strahl vom Einfallslote (Zeiger) um 32^0 absteht. Man macht den Versuch mit verschiedenen Einfallswinkeln, und findet das Gesetz bestätigt, daß Einfallswinkel = Reflexionswinkel.

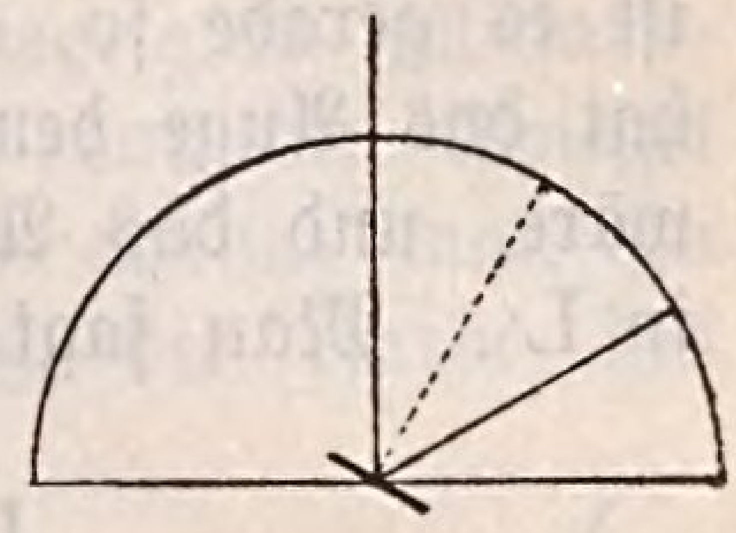


Fig. 238.

193. Planspiegel.

Eine glatte Grenzfläche zweier Medien nennt man Spiegel, und zwar Planspiegel, wenn die Fläche eben ist.

Wenn ein Bündel paralleler Lichtstrahlen auf einen Planspiegel fällt, so sind auch die reflektierten Strahlen unter sich parallel.

Wenn Lichtstrahlen von einem leuchtenden Punkte ausgehen, also divergent den Spiegel treffen, so divergieren auch die reflektierten Strahlen und zwar so, als ob sie von einem Punkte herkämen, der hinter dem Spiegel liegt eben so weit wie der leuchtende Punkt vor demselben, und zwar in der Verlängerung der vom leuchtenden Punkte auf den Spiegel gezogenen Senkrechten (Spiegelnormale).

Dieser physikalische Satz läßt sich mittels des Reflexionsgesetzes mathematisch ableiten.

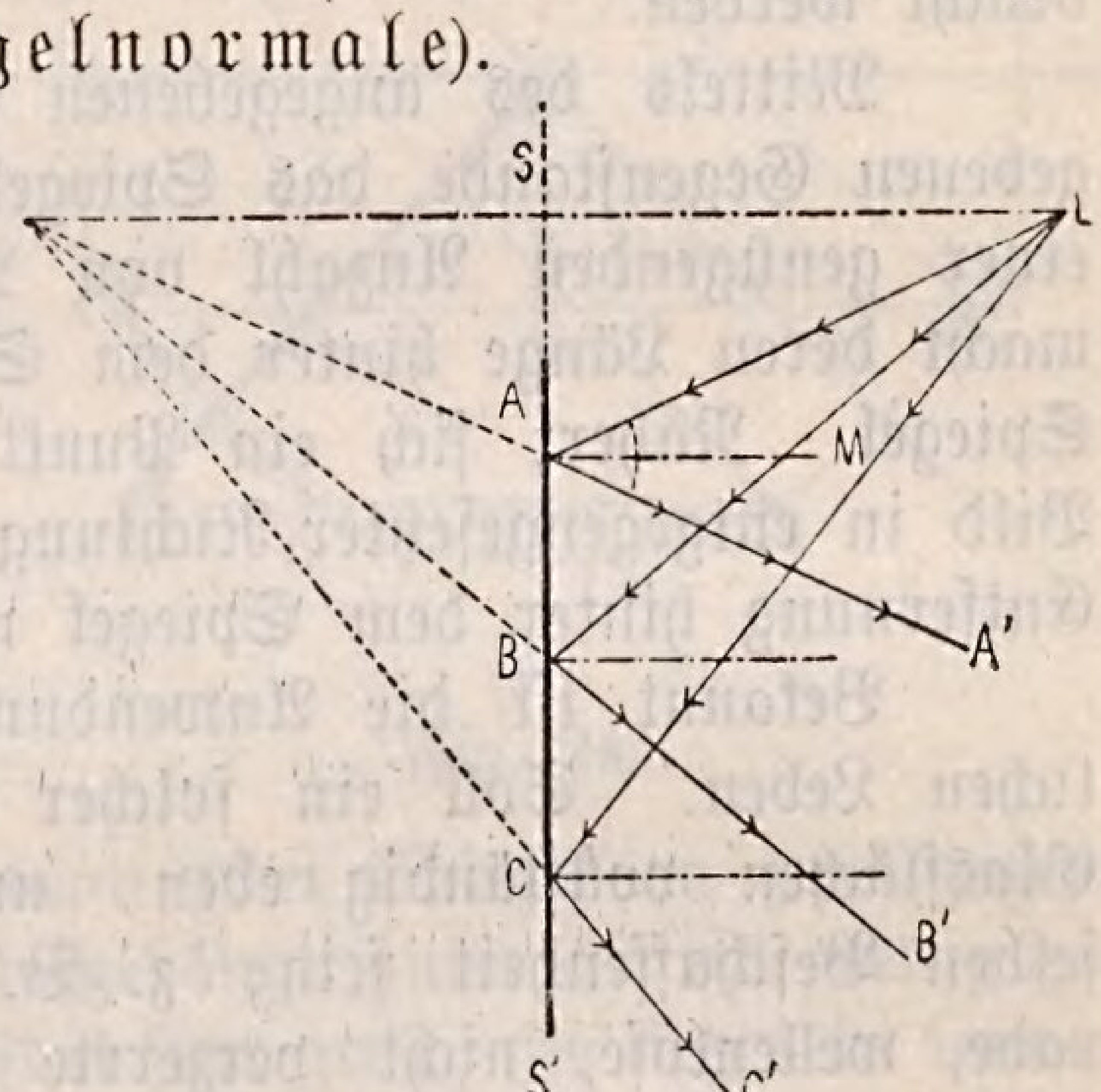


Fig. 239.

Es sei (Fig. 239) SS' der ebene Schnitt des Spiegels und L der leuchtende Punkt; ich mache LS $\perp$ SS', verlängerte LS, so daß L'S = LS, und beweise, daß jeder reflektierte Strahl durch L' geht. Sei LA ein beliebiger Strahl, so ziehe ich L'A und verlängere ihn nach AA', so ist $\triangle$LAS $\cong$ $\triangle$L'AS; [denn SL = SL', SA = SA, $\sphericalangle$ LSA = $\sphericalangle$ L'SA = R]; also $\sphericalangle$ LAS = $\sphericalangle$ L'AS; aber $\sphericalangle$ L'AS = $\sphericalangle$ S'AA', demnach $\sphericalangle$ LAS = $\sphericalangle$ S'AA' also auch, wenn MA $\perp$ SS' (Einfallslot LAM = A'AM; AA' ist also, da Einfallsw. = Reflexionsw., der reflektierte Strahl von LA. Was von LA bewiesen wurde, kann ebenso von jedem be=

liebigen anderen Strahle LB, LC ꝛc. bewiesen werden; also gehen die reflektierten Strahlen wirklich so, als wenn sie von L′ herkämen. Bringe ich mein Auge in den Gang der reflektierten Strahlen, so ist es gerade so, als wenn die Strahlen von L′ herkämen, deshalb hat das Auge den Eindruck, als wenn in L′ der leuchtende Punkt wäre, und das Auge sieht ein Bild des leuchtenden Punktes L in L′. Man sagt: **Der Planspiegel entwirft von dem leuchtenden Punkte L ein virtuelles Bild in L′, das in der Verlängerung der Spiegelnormale ebenso weit hinter dem Spiegel liegt als der leuchtende Punkt vor dem Spiegel.**

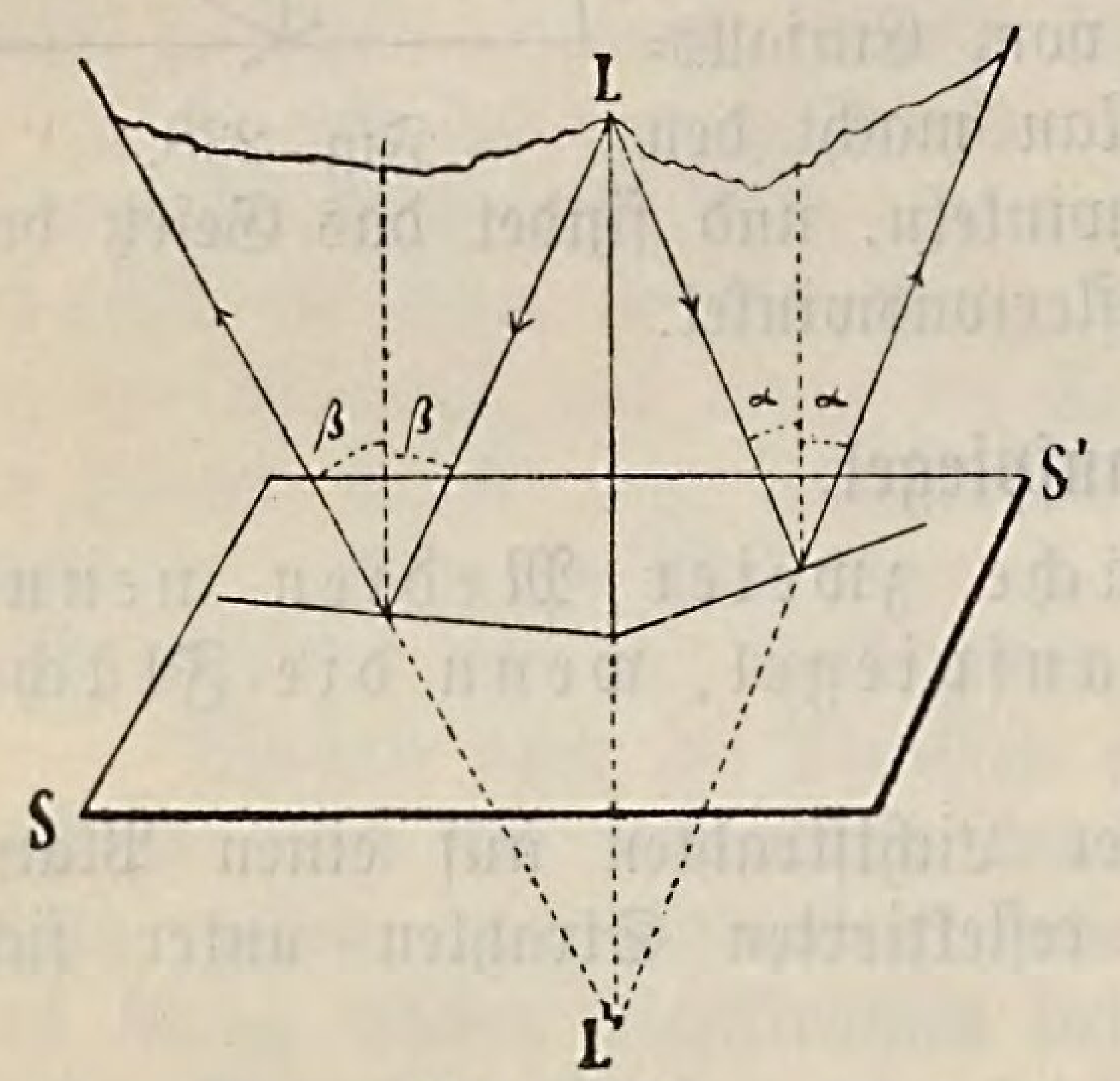


Fig. 240.

Das angegebene Gesetz gilt nicht bloß von Strahlen, welche in der Ebene LSS′ liegen. Läßt man, wie in Figur 240 angedeutet, von L Strahlen ausgehen, die nicht in einer Ebene liegen, so werden sie auch so reflektiert, als wenn sie vom Punkte L′ herkämen, dessen Lage dem angegebenen Gesetze entspricht. Beweis leicht. Damit der Spiegel das Licht entwirft, ist nicht notwendig, daß die vom leuchtenden Punkte auf die Spiegelebene gefällte Senkrechte den Spiegel selbst trifft, sie darf auch die Verlängerung des Spiegels treffen; soll aber das Auge das Bild sehen, so muß es in den Gang der reflektierten Lichtstrahlen gebracht werden.

Mittels des angegebenen Gesetzes kann man von einem gegebenen Gegenstande das Spiegelbild konstruieren; man zieht von einer genügenden Anzahl von Punkten die Spiegelnormalen und macht deren Länge hinter dem Spiegel gleich ihrer Länge vor dem Spiegel. Nähert sich ein Punkt dem Spiegel, so scheint sich das Bild in entgegengesetzter Richtung zu bewegen, indem es aus größerer Entfernung hinter dem Spiegel näher an denselben rückt.

Bekannt ist die Anwendung des ebenen Spiegels im täglichen Leben. Soll ein solcher Spiegel gut sein, so müssen die Glasflächen vollständig eben, und das Glas von durchaus derselben Beschaffenheit sein; z. B. eine Fensterkante muß als gerade, wellenlose, nicht verzerrte Linie wieder erscheinen, wie man auch das Auge bewegen mag. Das Glas sollte eigentlich möglichst dünn sein, denn es spiegelt nicht bloß die hintere, mit Metall belegte Fläche, sondern auch die vordere, allerdings schwächer. Es entstehen also stets zwei Bilder, welche nicht an derselben Stelle liegen, sondern um die doppelte Spiegeldicke von einander entfernt sind; sie decken sich also nicht vollständig, besonders wenn man

etwas schräg auf den Spiegel schaut, und verwischen einander. Bei Metallspiegeln, die nur an ihrer vorderen Fläche spiegeln, fällt dieser Mißstand weg, sie geben scharf begrenzte Bilder und werden deshalb für manche Zwecke vorgezogen. Das Spiegelglas soll farblos sein; hält man ein Stück weißer Leinwand vor den Spiegel und vergleicht dieses mit seinem Spiegelbilde, so erkennt man an der Farbe des letzteren (grünlich oder rötlich) die Farbe des Spiegelglases.

194. Winkelspiegel.

Sind zwei Planspiegel unter einem Winkel gegen einander geneigt, so nennt man sie einen Winkelspiegel. Befindet sich ein leuchtender Punkt zwischen beiden, so entsteht von ihm eine Reihe von Bildern. Es sei A der leuchtende Punkt (Fig. 241), so entwirft Spiegel I das Bild A'; da dies Bild vor Spiegel II liegt, also seine Strahlen den Spiegel II treffen, so entwirft dieser das Bild A''; dies Bild liegt vor I, also entwirft I das Bild A'''; dies liegt vor II, also entwirft II das Bild A''''; A'''' liegt hinter I, also spiegelt es sich nicht mehr. Nun spiegelt sich A auch in II; II entwirft also das Bild B; von ihm entwirft I das Bild B'; von ihm entwirft II das Bild B''; von ihm I das Bild B''', das bei der in der Figur angenommenen Anordnung ($\sphericalangle$ v. 45^0) mit A'''' zusammenfällt.

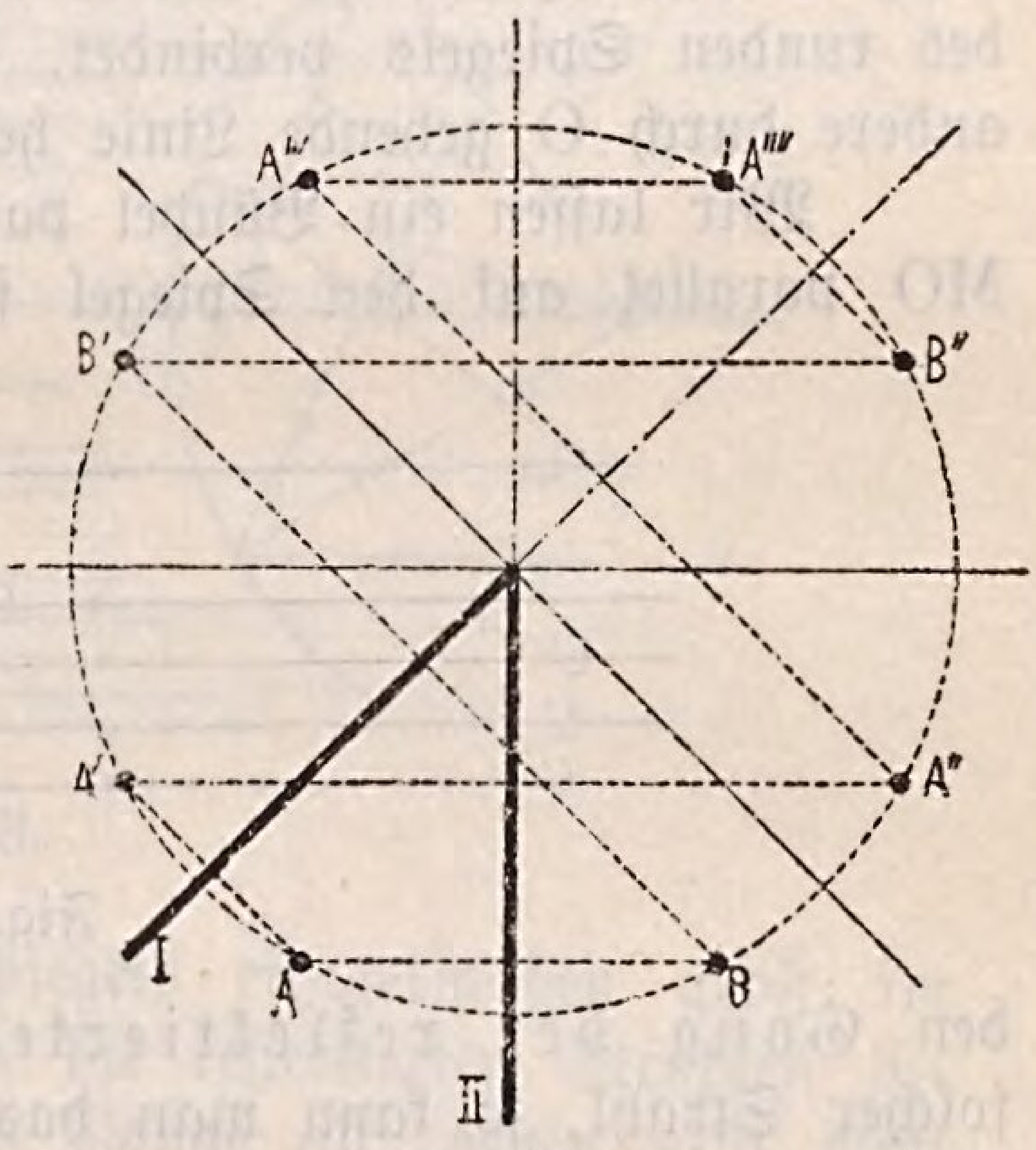


Fig. 241.

Leicht ist zu beweisen, daß die Bilder in einem Kreise liegen, dessen Ebene senkrecht zur Schnittlinie der Spiegel ist; leicht ist zu sehen, daß ihre Anzahl, den Gegenstand mitgerechnet, = 8 ist, und allgemein $= \frac{360}{a}$, wenn die Neigung der beiden Spiegel a^0 ist. Die Anzahl der Bilder wächst also, wenn der Winkel kleiner wird. Ist der Winkel klein, wie etwa, wenn zwei Spiegel an zwei gegenüberliegenden parallelen Wänden aufgehängt und nur ein wenig geneigt sind, so ist die Zahl der Bilder sehr groß; sie liegen in immer größeren Entfernungen auf der Peripherie eines Kreises von sehr großem Radius, werden immer lichtschwächer und kleiner. Eine Anwendung ist das bekannte Spielzeug Kaleidoskop, bestehend aus drei unter je 60^0 gegen einander geneigten spiegelnden Glasstreifen, die in eine Röhre gefaßt sind; vor derselben zwischen zwei Deckgläsern liegen kleine Stückchen farbigen Glases, welche durch Drehen

und Schütteln immer in andere Lage gebracht werden können. Durch die Spiegelung setzen sich aus den Glasstückchen und deren Spiegelbildern sechsseitige Sternfiguren zusammen, die durch ihre Regelmäßigkeit gefallen und durch ihre Wandelbarkeit ergötzen.

Das Debuskop ist ein Winkelspiegel aus zwei Silberspiegeln zusammengestellt; sein Winkel kann beliebig verändert werden; stellt man es auf eine Zeichnung, so sieht man sie zu einem regelmäßigen Stern vervielfältigt, und kann sich so aus unregelmäßigen Strichen Motive zu gefälligen Sternmustern suchen.

195. Sphärische Spiegel.

Unter einem sphärischen Spiegel versteht man einen Spiegel, der so gekrümmt ist, wie die Oberfläche einer Kugel; ist dabei die innere, hohle Seite der Fläche spiegelnd, so heißt er ein Hohlspiegel oder konkaver sphärischer Spiegel; ist die äußere Seite spiegelnd, so heißt er ein konvexer Spiegel.

Brennpunkt des Hohlspiegels.

Die Hohlspiegel sind gewöhnlich rund, und man nennt dann die Linie, welche den Krümmungsmittelpunkt mit der Mitte des runden Spiegels verbindet, also OM, die Hauptachse; jede andere durch O gehende Linie heißt eine Nebenachse des Spiegels.

Wir lassen ein Bündel paralleler Lichtstrahlen der Hauptachse MO parallel auf den Spiegel fallen (Fig. 242) und untersuchen

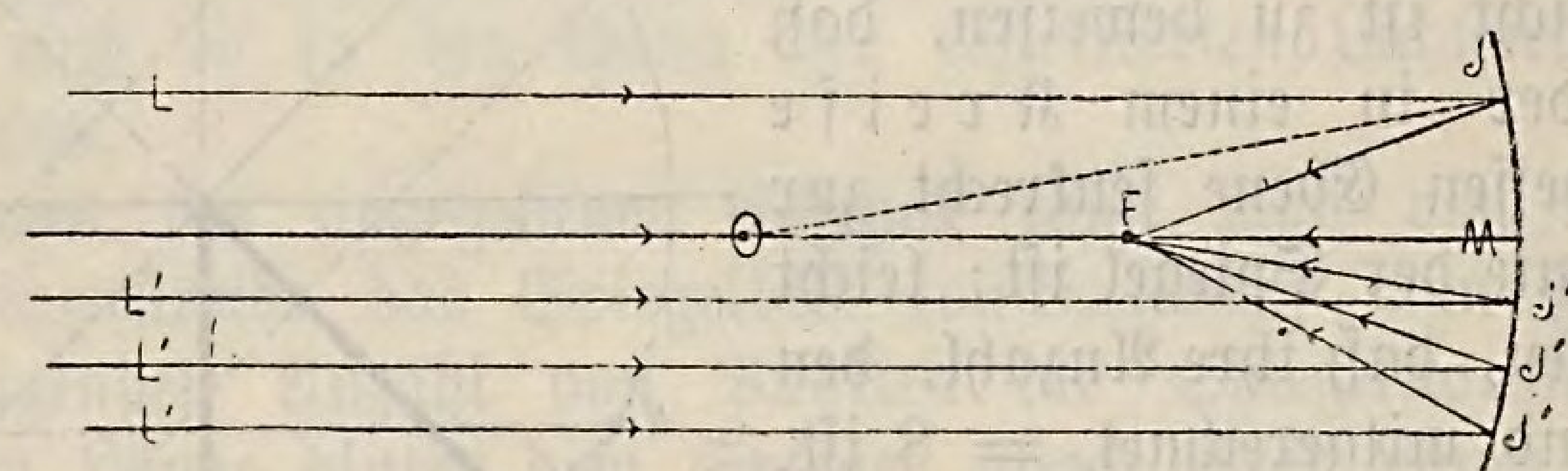


Fig. 242.

den Gang der reflektierten Strahlen. Es sei LJ ein solcher Strahl, so kann man das in J liegende Flächenstückchen des Spiegels als eben betrachten, das Einfallslot ist dann der Krümmungsradius JO, da er senkrecht auf der Fläche steht. Ich mache nun den Reflexionswinkel gleich dem Einfallswinkel, und nenne den Schnittpunkt des reflektierten Strahles mit der Achse F. Nun ist LJO = OJF (Reflexionsges.), LJO = JOF (Wechselwinkel), also OJF = JOF, somit △FJO gleichschenklig, oder JF = FO. Wir nehmen nun an, J liege so nahe an M, daß man, ohne einen nennenswerten Fehler zu begehen, JF = FM setzen kann, so ist auch FM = FO, d. h. der Punkt, in welchem der reflektierte Strahl die Achse schneidet, liegt in der Mitte des Radius. Nehme ich nun

noch beliebige andere parallele Strahlen L′J′, so gilt für jeden dieselbe Ableitung und dasselbe Resultat. Es gilt dies nicht bloß von den Strahlen, welche in dem in der Figur gezeichneten Schnitte liegen, sondern von allen Strahlen, da alle durch die Achse gehenden Schnitte dieselbe Figur liefern. Folglich: **Alle parallel der Hauptachse auffallenden Strahlen gehen nach der Reflexion durch denselben Punkt** F, zwar nicht ganz genau, aber um so genauer, je näher sie an der Mitte M auffallen (solche Strahlen JL nennt man Zentralstrahlen).

Läßt man Sonnenlicht auf den Hohlspiegel fallen, so wird alles auf den Hohlspiegel fallende Licht in einen kleinen Fleck vereinigt, ebenso aber auch alle Wärmestrahlen; es ist deshalb in diesem Punkte (Flecke) sehr viel Wärme vereinigt, so daß ein leicht entzündlicher Körper, wie Papier, dort entzündet wird. Man nennt deshalb diesen Punkt F den Brennpunkt oder Fokus, seinen Abstand vom Spiegel, also FM, die Brennweite oder Fokaldistanz, f, und den Hohlspiegel auch Brennspiegel.

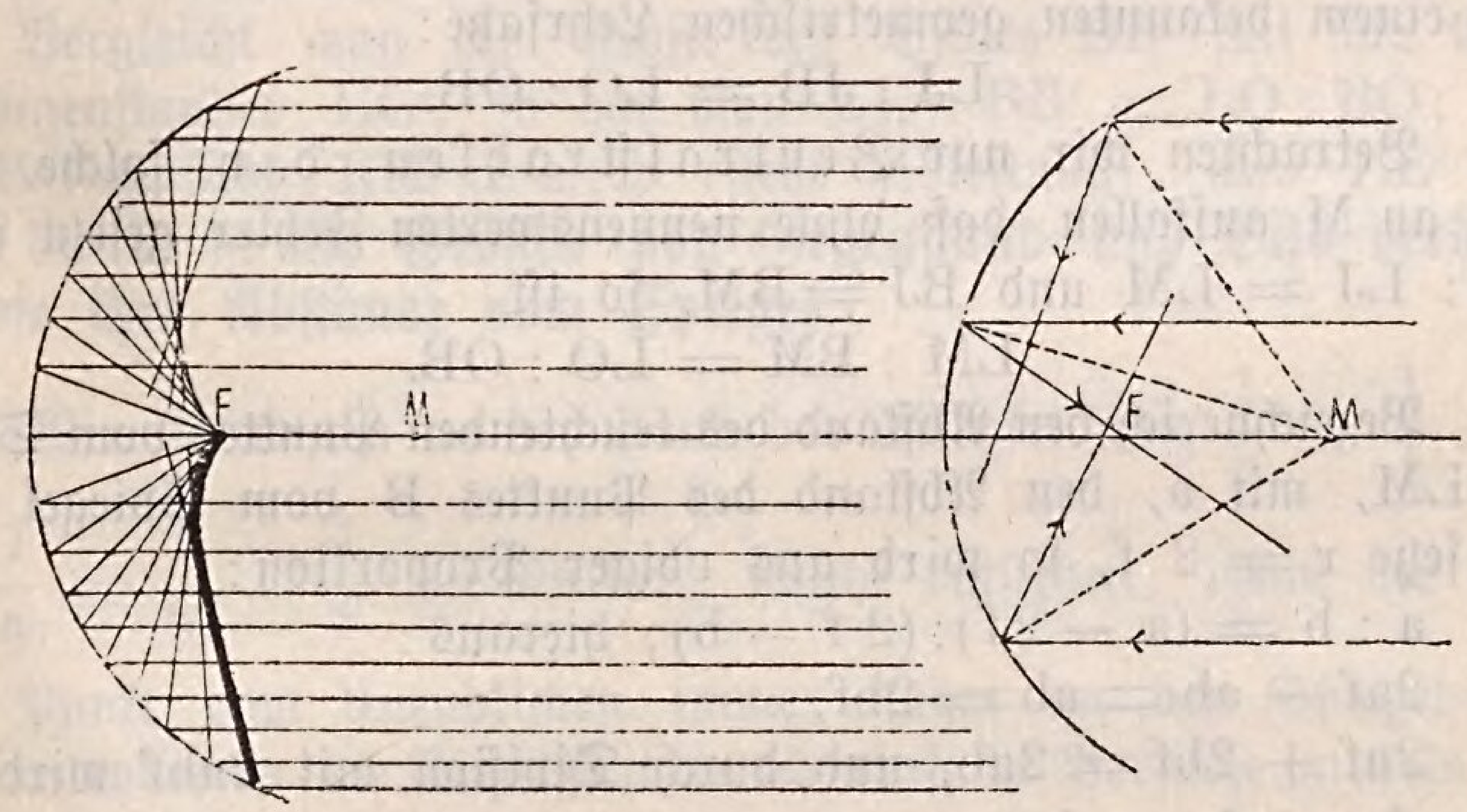


Fig. 243.

Ist die Öffnung eines Hohlspiegels einigermaßen groß im Verhältnis zum Radius, so weichen die reflektierten Strahlen beträchtlich von dem eben beschriebenen Gange ab, gehen also nicht mehr alle durch den Brennpunkt, sondern berühren, wie man durch geometrische Konstruktion der reflektierten Strahlen findet, eine krumme Linie, welche im Brennpunkte eine Spitze hat. Die Punkte dieser Linie haben auch die Eigenschaft, daß sich in ihnen sehr viele benachbarte reflektierte Strahlen (nahezu) schneiden, deshalb wird diese Linie eine Brennlinie oder katakaustische Linie genannt.

Betrachtet man nicht nur den in der Figur gezeichneten Achsenschnitt, sondern alle Achsenschnitte, so ergibt sich für jeden Schnitt eine Brennlinie; sie erfüllen eine Brennfläche, die katakaustische Fläche.

196. Bildgleichung des Hohlspiegels.

Wir lassen das Licht ausgehen von einem auf der Hauptachse im Endlichen liegenden Punkte L und untersuchen den Gang der reflektierten Strahlen (Fig. 244). Es sei LJ der einfallende Strahl, so ist wieder OJ das Einfallslot; ich ziehe nach dem Reflexionsgesetze den reflektierten Strahl JB so, daß LJO = OJB, und bezeichne den Schnittpunkt des reflektierten Strahles mit der Achse mit B.

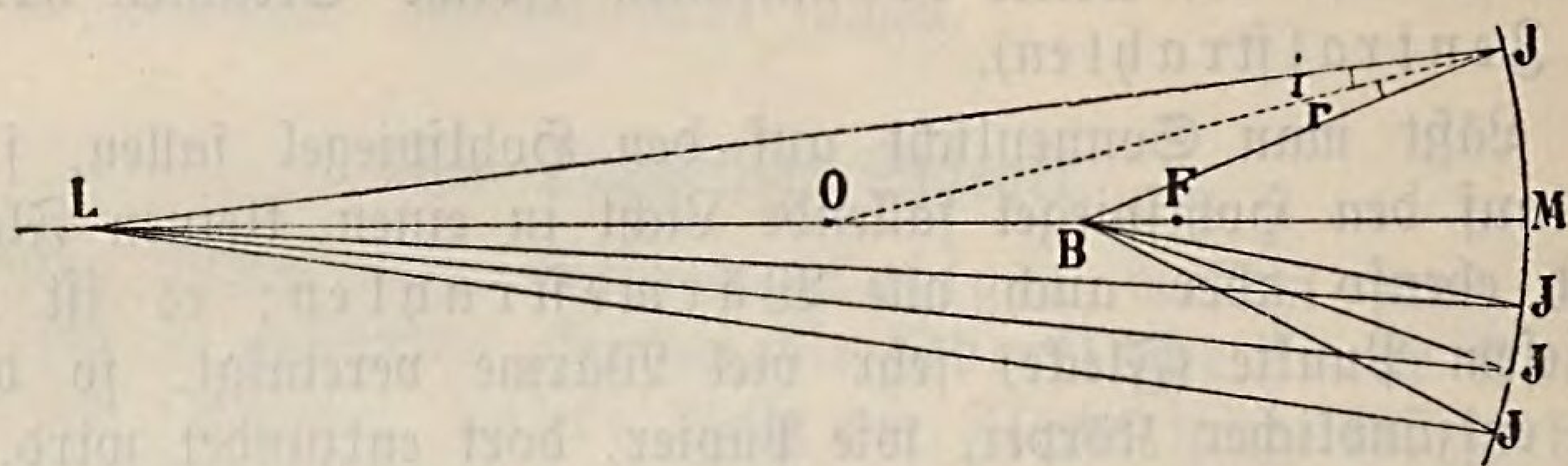


Fig. 244.

Es ist dann in △ BJL der Winkel an der Spitze halbiert, daher nach einem bekannten geometrischen Lehrsatze:

$$LJ : JB = LO : OB.$$

Betrachten wir nur Zentralstrahlen, d. h. solche, die so nahe an M auffallen, daß ohne nennenswerten Fehler gesetzt werden kann: LJ = LM und BJ = BM, so ist

$$LM : BM = LO : OB.$$

Bezeichne ich den Abstand des leuchtenden Punktes vom Spiegel, also LM, mit a, den Abstand des Punktes B vom Spiegel mit b und setze $r = 2\,f$, so wird aus obiger Proportion:

$a : b = (a - 2f) : (2\,f - b)$; hieraus:

$2af - ab = ab = 2bf$,

$2af + 2bf = 2ab$, und durch Division mit $2abf$ wird

$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$. Aus dieser Gleichung kann b berechnet werden. Betrachte ich noch beliebige andere Zentralstrahlen LJ′, so kann für jeden dieselbe Ableitung gemacht werden, und es ergibt sich also für jeden dieselbe Gleichung. Daraus folgt, daß alle reflektierten Strahlen durch denselben Punkt B gehen. Man hat also den Satz: **Liegt der leuchtende Punkt auf der Hauptachse, so gehen die reflektierten Strahlen alle durch einen Punkt B der Hauptachse.** Dieser Punkt B ist deshalb ein Bild des leuchtenden Punktes L, und sein Abstand b vom Spiegel berechnet sich aus der Gleichung

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad \text{(Bildgleichung).}$$

Lichtpunkt L und Bildpunkt B liegen harmonisch zu O und M, oder Lichtpunkt und Bildpunkt teilen den Radius äußerlich und innerlich in demselben Verhältnisse.

197. Größe, Art und Lage der Bilder beim Hohlspiegel.

Halte ich in B einen kleinen Schirm (ein kleines Papierstückchen), so wird ein Punkt desselben von allen reflektierten Strahlen getroffen, also beleuchtet; man sagt, dies Bild ist auf einem Schirm auffangbar.

Liegt der leuchtende Punkt nicht in L (Fig. 245), sondern senkrecht zur Achse etwas entfernt in L′, so kann man L′O als

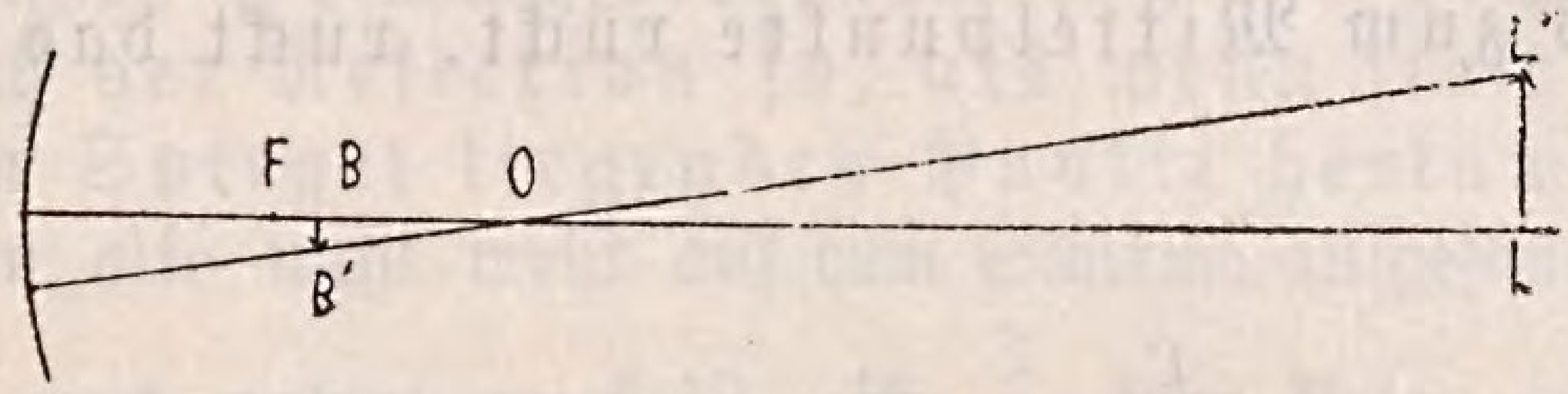


Fig. 245.

dessen Achse ansehen und findet sein Bild in B′, wobei auch B′B senkrecht zur Achse. Besteht der leuchtende Körper aus der Linie LL′, so ist das Bild BB′.

Vergleicht man die Größe des Bildes BB′ mit der Größe des Gegenstandes LL′, so hat man LL′ : BB′ = LO : BO; aber LO : BO = LM : BM = a : b (siehe Ableitung), also LL′ : BB′ = a : b; d. h. **die Größen von Gegenstand und Bild verhalten sich wie ihre Abstände vom Spiegel.**

Wir betrachten an der Hand der Bildgleichung $\frac{1}{b} = \frac{1}{f} - \frac{1}{a}$ oder $\frac{1}{a} = \frac{1}{b} - \frac{1}{f}$ die Bilder, welche entstehen, wenn der leuchtende Punkt vom Unendlichen immer näher an den Spiegel rückt, und kontrollieren die Richtigkeit durch einfache Versuche mittels eines

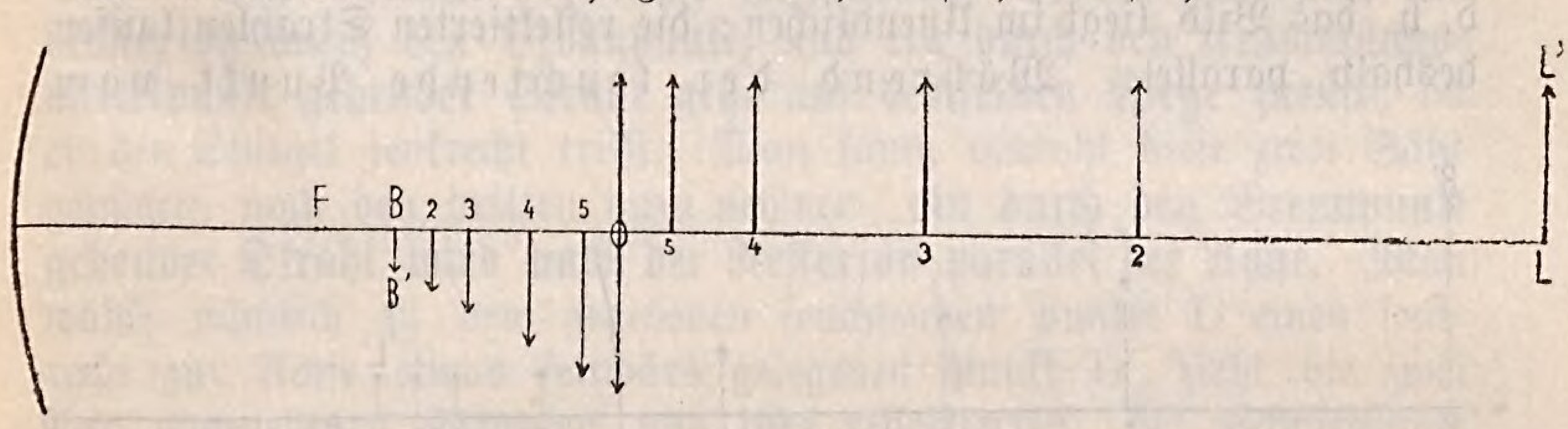


Fig. 246.

Hohlspiegels, einer Flamme und eines beweglichen Papierschirmes.

Liegt der Punkt im Unendlichen, so ist a = ∞, $\frac{1}{a} = 0$, also $\frac{1}{b} = \frac{1}{f}$, also b = f; das Bild liegt im Brennpunkte. Rückt L vom Unendlichen gegen den Spiegel (Fig. 246), so wird

a kleiner, $\frac{1}{a}$ größer, demnach $\frac{1}{b}$ kleiner, also b größer; das Bild rückt vom Brennpunkte aus vom Spiegel weg, anfangs sehr langsam, später rascher. Rückt L bis in den Mittelpunkt O, so ist $a = 2f$, also $\frac{1}{b} = \frac{1}{f} - \frac{1}{2f} = \frac{1}{2f}$ also $b = 2f$, d. h. auch das Bild ist im Mittelpunkt angekommen und ist dann ebenso groß wie der Gegenstand. Während der leuchtende Punkt vom Unendlichen bis zum Mittelpunkte rückt, rückt das Bild vom

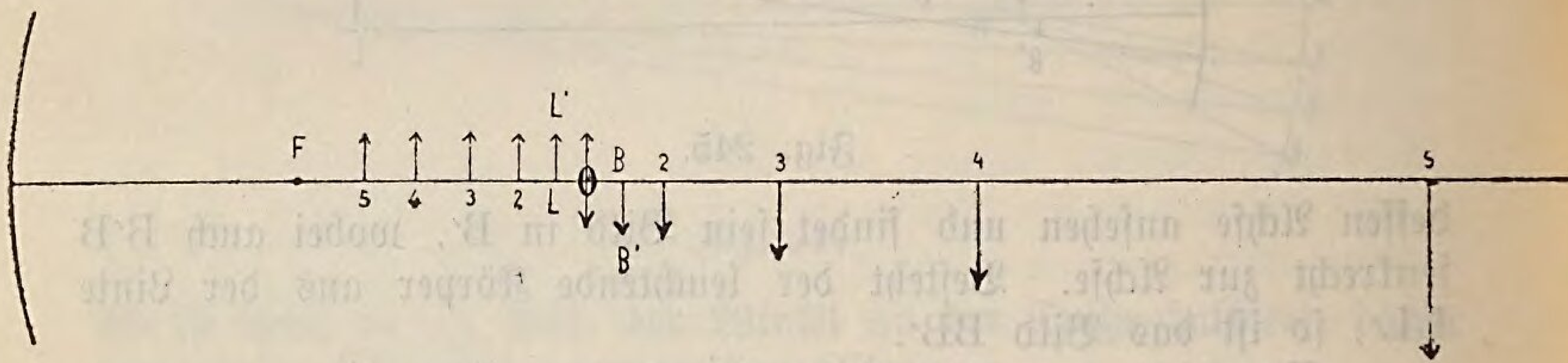


Fig. 247.

Brennpunkte bis zum Mittelpunkte, die Bilder des Gegenstandes sind dabei verkehrt, reell, verkleinert, aber wachsend.

Rückt L noch näher an den Spiegel (Fig. 247), so wird a noch kleiner, $\frac{1}{a}$ größer, somit $\frac{1}{b}$ kleiner, also b größer, d. h. das Bild rückt noch weiter vom Spiegel. Kommt dabei der leuchtende Punkt in den Brennpunkt, so ist $a = f$, also $\frac{1}{b} = 0$ und $b = \infty$, d. h. das Bild liegt im Unendlichen; die reflektierten Strahlen laufen deshalb parallel. Während der leuchtende Punkt vom

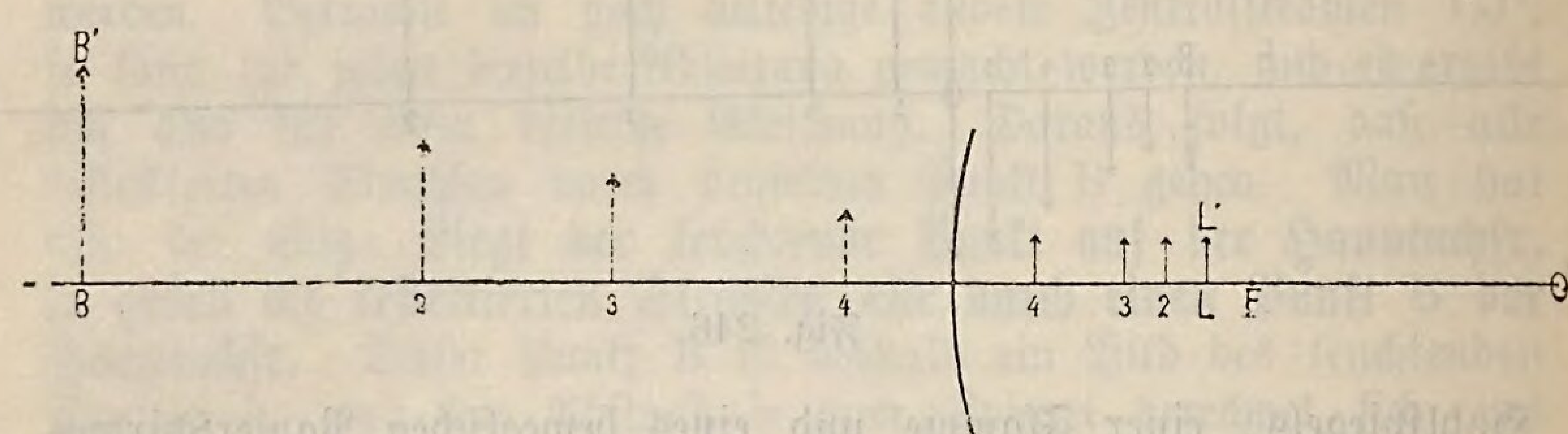


Fig. 248.

Mittelpunkte bis zum Brennpunkte rückt, rückt das Bild vom Mittelpunkte ins Unendliche, die Bilder des Gegenstandes sind verkehrt, reell, vergrößert und wachsend. Der Brennpunkt selbst bekommt dadurch noch eine

weitere Bedeutung: es ist der Punkt, von dem die Strahlen ausgehen müssen, damit sie nach der Reflexion parallel der Achse laufen.

Rückt L noch näher an den Spiegel (Fig. 248), so wird $a < f$, also $\frac{1}{a} > \frac{1}{f}$, somit b negativ; das bedeutet, das Bild liegt nicht mehr vor, sondern hinter dem Spiegel (wie beim Planspiegel), ist demnach virtuell, d. h. die Lichtstrahlen laufen nach der Reflexion so, als wenn sie von einem hinter dem Spiegel liegenden Punkte herkämen. Diese Bilder können also nicht mehr auf dem Schirme aufgefangen werden. So lange a noch nahezu $= f$ ist, ist $\frac{1}{b}$ sehr klein, also b sehr groß, die Bilder liegen sehr weit hinter dem Spiegel und sind deshalb stark vergrößert. Rückt der leuchtende Punkt ganz an den Spiegel, ist also $a = 0$, also $\frac{1}{a} = \infty$, so ist $\frac{1}{b} = -\infty$, also $b = 0$, d. h. auch das Bild liegt am Spiegel. Während der leuchtende Punkt vom Brennpunkte an den Spiegel rückt, liegt das Bild hinter dem Spiegel und rückt vom Unendlichen auch bis zum Spiegel; die Bilder sind dabei virtuell, aufrecht und vergrößert, aber abnehmend.

198. Konstruktion der Bilder beim Hohlspiegel.

Man kann Ort, Art und Größe dieser Bilder auch durch eine geometrische Konstruktion finden durch Benützung der beiden Sätze: **Ein parallel der Achse auffallender Strahl geht nach der Reflexion durch den Brennpunkt, und ein durch den Krümmungsmittelpunkt gehender Strahl geht auf demselben Wege zurück,** da er den Spiegel senkrecht trifft. Man kann, obwohl diese zwei Sätze genügen, noch den dritten dazu nehmen: **ein durch den Brennpunkt gehender Strahl wird nach der Reflexion parallel der Achse.** Man wählt nämlich zu dem gegebenen leuchtenden Punkte L einen senkrecht zur Achse etwas seitwärts gelegenen Punkt L′, zieht die zwei eben angegebenen Strahlen und ihre reflektierten, der Schnittpunkt B′ dieser reflektierten Strahlen ist dann das Bild von L′; zieht man noch B′B senkrecht zur Achse, so ist BB′ das Bild von LL′. Auf solche Weise sind obenstehende Konstruktionen Fig. 249 ausgeführt unter Benützung aller drei Sätze. Jedoch ist zu beachten, daß man nur Zentralstrahlen benützen darf, wenn man eine einigermaßen brauchbare Konstruktion bekommen will, daß aber gerade bei Benützung von Zentralstrahlen der Schnittpunkt der reflektierten Strahlen sehr unsicher wird. Die Ausführung solcher Konstruktionen

ist deshalb zwar gut, wenn man sich den Gang der Lichtstrahlen und das Zustandekommen des Bildes betrachten und klar machen

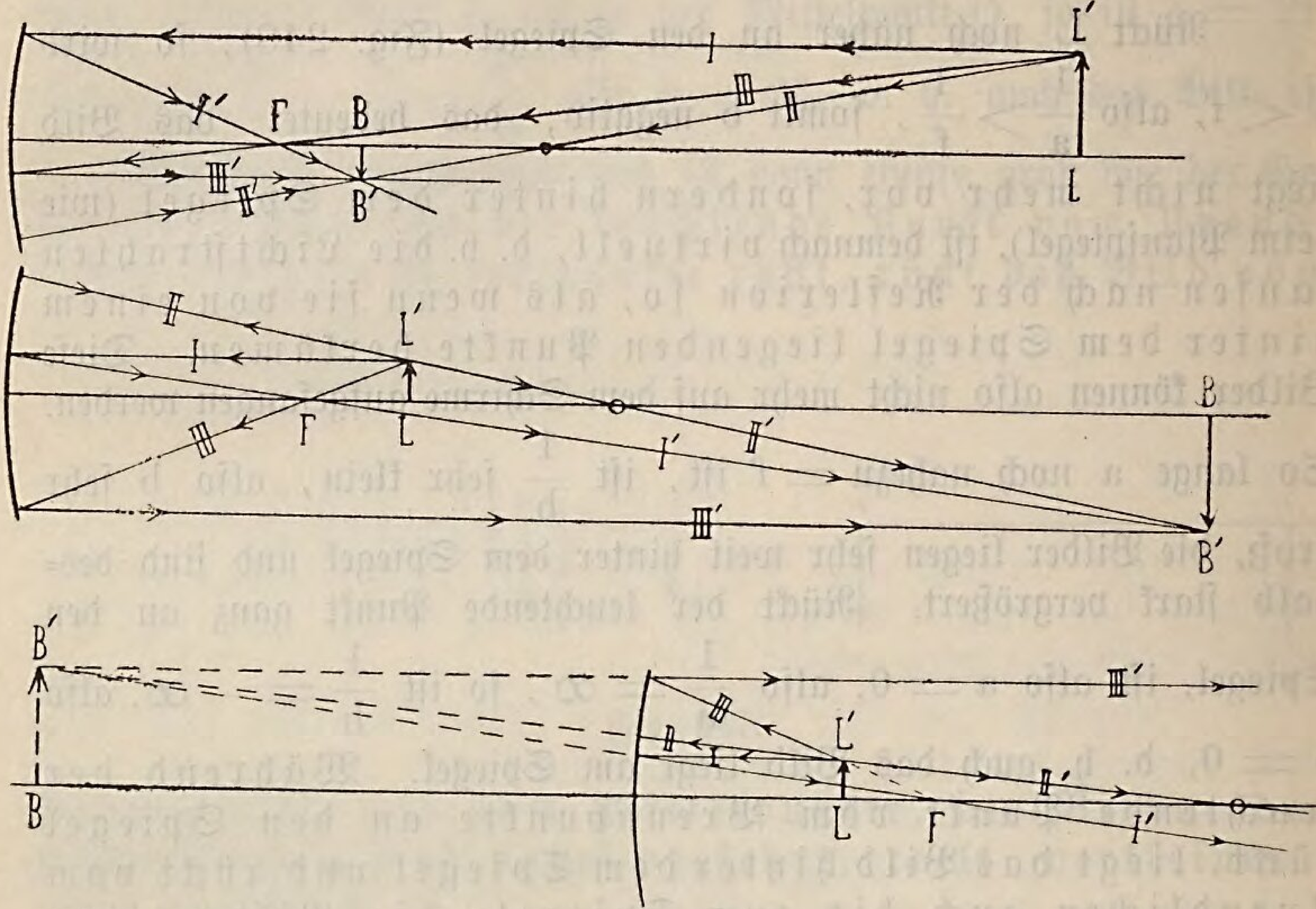


Fig. 249.

will; aber für praktische Zwecke zieht man die leichte Berechnung mittels der Bildung vor.

Man kann auch leicht eine geometrische Konstruktion angeben, so daß b dem aus der Bildgleichung entspringenden Wert $\frac{af}{a-f}$ entspricht. Z. B. Auf den Schenkeln eines beliebigen Winkels XOY trage man von O aus OF = OF′ = f, vervollständige damit den Rhombus OFMF′ und zieht durch M eine beliebige Gerade, welche OX in A, OY in B schneidet, so ist, wenn OA = a, OB = b. Beweis?

199. Anwendung des Hohlspiegels; Brennspiegel.

Der Hohlspiegel wird als Brennspiegel verwendet. Die Sonne hat einen Durchmesser von 185640 geogr. M. und eine Entfernung von 19 936 000 geogr. M.; das Bild der Sonne, das der Hohlspiegel erzeugt, liegt im Brennpunkte; ist die Brennweite etwa 100 *cm*, so ist der Durchmesser des Sonnenbildes = x zu berechnen aus 19 936 000 : 185 640 = 100 : x; x = 0,93 *cm*. Alle auf den Spiegel fallenden Sonnenstrahlen werden demnach auf eine Kreisfläche von 0,93 *cm* Durchmesser vereinigt. Hat der runde Hohlspiegel etwa einen Durchmesser von 50 *cm*, so ist seine Fläche $\frac{50^2 \cdot 3{,}14}{4}$ *qcm*, die Fläche des Bildes ist $\frac{0{,}93^2 \cdot 3{,}14}{4}$ *qcm*, also

$\frac{50^2}{0{,}93^2}$ mal kleiner; die Brennfläche erhält also ca. 2900 mal mehr Licht und Wärme als eine direkt von der Sonne beschienene gleichgroße Fläche; allerdings geht davon ein großer Teil, etwa die Hälfte, bei der Reflexion verloren; doch bleibt genug übrig, um eine intensive Erhitzung eines in den Brennpunkt gebrachten Körpers zu erzielen. Mit großen solchen Hohlspiegeln kann man Platin schmelzen, sogar verdampfen.

Man verwendet die durch große Brennspiegel gesammelte Sonnenwärme sogar zum Heizen eines kleinen Dampfkessels; dabei hat der Hohlspiegel einen Durchmesser von 2 *m* und mehr, in der Nähe seines Brennpunktes ist ein kleiner, außen mit Ruß geschwärzter Dampfkessel angebracht. Die Sonnenwärme genügt, das Wasser zu verdampfen und damit eine kleine Dampfmaschine zu treiben; der Hohlspiegel ist drehbar aufgestellt, um dem Gang der Sonne folgen zu können. Tschirnhaus machte 1687 zuerst einen großen Brennspiegel aus Kupfer mit drei Leipziger Ellen Durchmesser, zwei Ellen Brennweite und erzielte mächtige Wirkung. Als die Akademie von Florenz vor dem Brennspiegel große Eismassen aufstellte und in den Brennpunkt ein Thermometer brachte, sank dieses; warum?

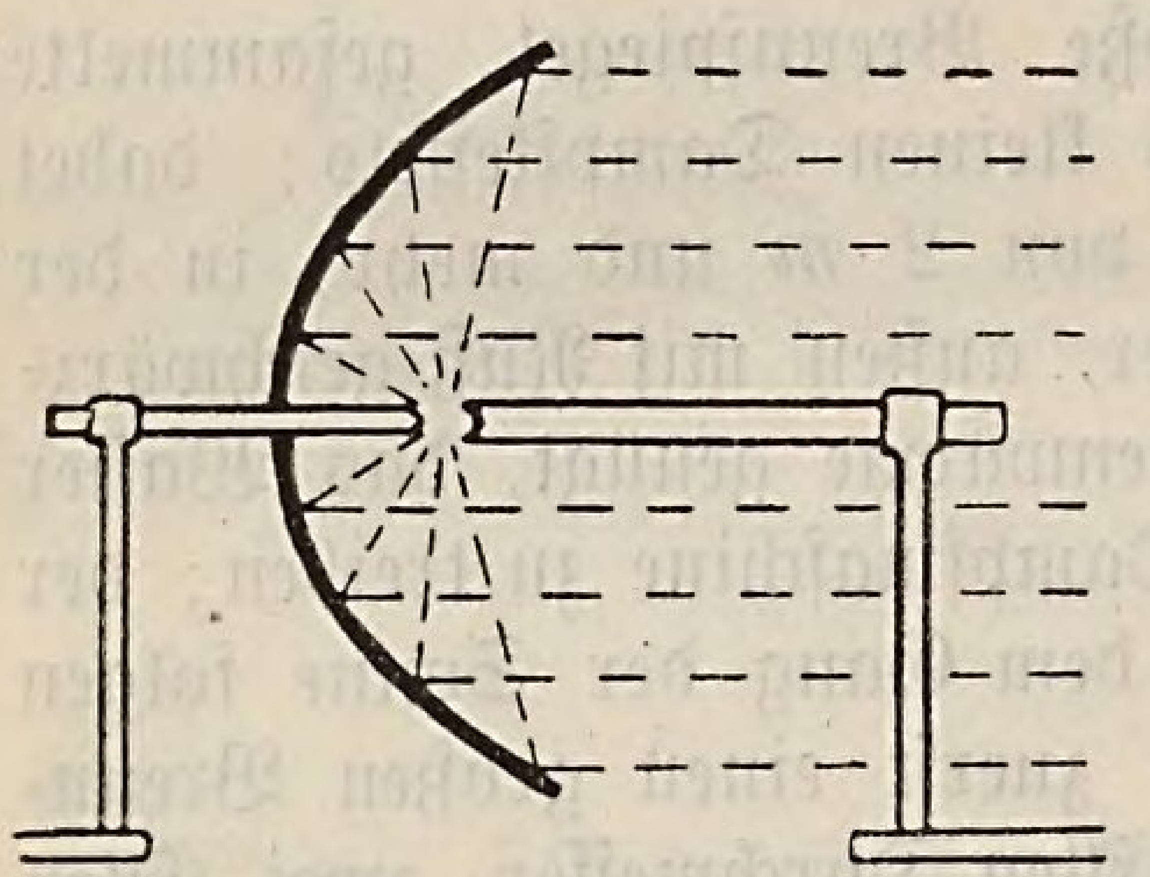
200. Beleuchtungsspiegel.

Der Arzt verwendet den Hohlspiegel, um das Innere des Auges oder des Ohres oder den hintern Teil der Rachenhöhle oder den Kehlkopf stark zu beleuchten und so auf Krankheit untersuchen zu können, indem er durch ein kleines in der Mitte des Spiegels angebrachtes Loch blickt; ein solcher Spiegel heißt dann je nach seinem Zwecke Augenspiegel u. s. w. (Helmholtz.)

Man verwendet den Hohlspiegel zur Beleuchtung fern liegender Gegenstände. Stellt man eine stark leuchtende Lampe in den Brennpunkt des Hohlspiegels, so wird alles auf den Hohlspiegel fallende Licht (das nicht absorbiert wird) in einer zur Achse parallelen Richtung reflektiert, kann demnach einen fern liegenden Gegenstand gut beleuchten. Das vom Hohlspiegel reflektierte Licht ist jedoch nicht vollkommen parallel, sondern divergiert etwas; denn 1) es ist nicht möglich, die Lampe genau in den Brennpunkt zu stellen; 2) die Flamme ist nicht nur ein leuchtender Punkt, sondern ein leuchtender Fleck; die von den verschiedenen Punkten derselben ausgehenden Lichtstrahlen werden demnach auch nach verschiedenen Richtungen reflektiert; 3) um möglichst viel Licht mit einem solchen Reflektor aufzufangen und fortzuschicken, macht man den Hohlspiegel möglichst groß; aber die nahe am Rande auffallenden Strahlen werden dann nicht mehr in derselben (zur Achse parallelen) Richtung reflektiert wie die Zentralstrahlen. Das vom Hohlspiegel

reflektierte Licht beleuchtet demnach nicht bloß eine dem Hohlspiegel gleich große, sondern eine verhältnismäßig viel größere Fläche, etwa ein ganzes Haus.

Man wendet deshalb sphärische Hohlspiegel von mehr als etwa 60° Weite nicht an; will man noch mehr Licht auffangen, so benützt man parabolische Hohlspiegel (Fig. 250). Solche sind gekrümmt wie das Rotationsparaboloid; das ist die Fläche, welche entsteht, wenn man eine Parabel um ihre Achse dreht.


Fig. 250.

Die Parabel hat die Eigenschaft, daß die vom Brennpunkte ausgehenden Lichtstrahlen genau parallel der Achse reflektiert werden. Ist das Licht eine Flamme, deren Punkte nicht alle im Brennpunkte stehen können, so divergiert das reflektierte Licht auch beträchtlich. Benützt man aber elektrisches Licht, indem man die positive Kohle mit ihrem „Krater" dem Spiegel zukehrt, so hat ja das elektrische Licht nur geringe Ausdehnung (einige *mm*), deshalb divergiert das reflektierte Licht nur wenig; noch dazu wird ein sehr großer Teil des elektrischen Lichtes vom Spiegel aufgefangen und reflektiert; deshalb wird sehr viel Licht mit geringer Divergenz fortgeschickt und so erreicht, daß auch sehr weit entfernte Gegenstände noch sehr gut beleuchtet werden können. So wendet man das elektrische Licht auf Leuchttürmen, im Kriege u. s. w. an.

Die Stirnlampe der Lokomotiven, durch welche die vorliegende Bahnstrecke beleuchtet werden soll, sind meist aus sehr vielen kleinen Planspiegeln zusammengesetzt, die so auf einem gekrümmten Bleche festgekittet sind, daß sie möglichst gut mit einer Parabelfläche übereinstimmen. Der Beleuchtungszweck wird dadurch recht gut erreicht.

Hohlspiegel von geringer Krümmung benützt man als Toilette-, Rasierspiegel u. s. w., indem man sich so nahe vor den Spiegel stellt, daß man sich zwischen Brennpunkt und Spiegel befindet und nun, ähnlich wie beim Planspiegel sein eigenes, virtuelles, aufrechtes, aber nun vergrößertes Bild betrachtet.

Eine weitere wichtige Anwendung des Hohlspiegels beim Fernrohre werden wir später besprechen.

201. Konvexe Spiegel.

Beim konvexen Spiegel spiegelt die äußere Fläche einer sphärischen Fläche. Da die Anwendung sehr unbedeutend ist, so genügen folgende Andeutungen. Der Brennpunkt liegt in der Brenn-

weite $f = \frac{1}{2} r$, liegt aber hinter dem Spiegel und ist virtuell; d. h. nach der Reflexion gehen die Strahlen so auseinander, als wenn sie von dem hinter dem Spiegel liegenden Punkte herkämen.

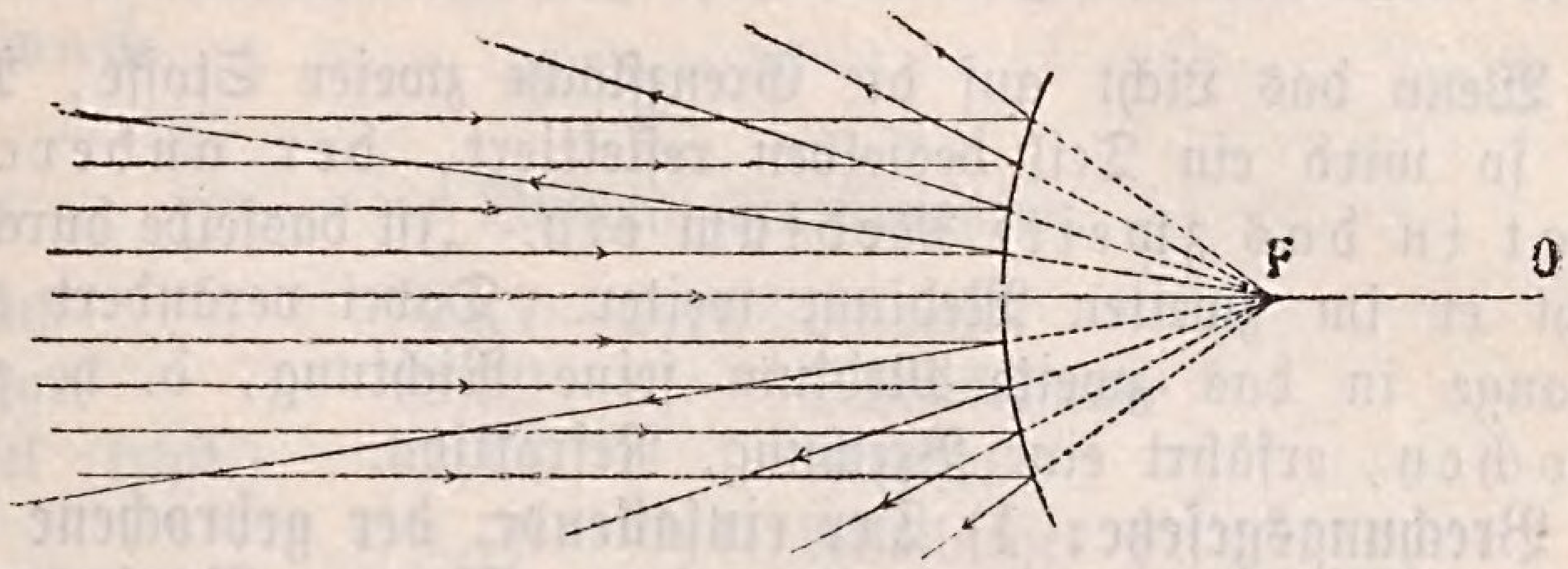


Fig. 251.

In der mathematischen Ableitung setze man den Krümmungsradius, der diesmal die entgegengesetzte Richtung hat wie beim konkaven Spiegel, $= - r$, so wird auch f negativ.

Man findet dieselbe Bildgleichung $\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}$ wobei aber f negativ zu nehmen ist; thun wir dies, so ist $\frac{1}{b} = -\frac{1}{f} - \frac{1}{a}$, also b stets negativ und den absoluten Betrag nach kleiner als f; wenn also der leuchtende Punkt vom Unendlichen bis an den Spiegel rückt, so befindet sich das Bild stets hinter dem Spiegel und rückt vom Brennpunkte gegen den Spiegel; die Bilder des Gegenstandes sind virtuell, aufrecht und verkleinert, können also von einem vor dem

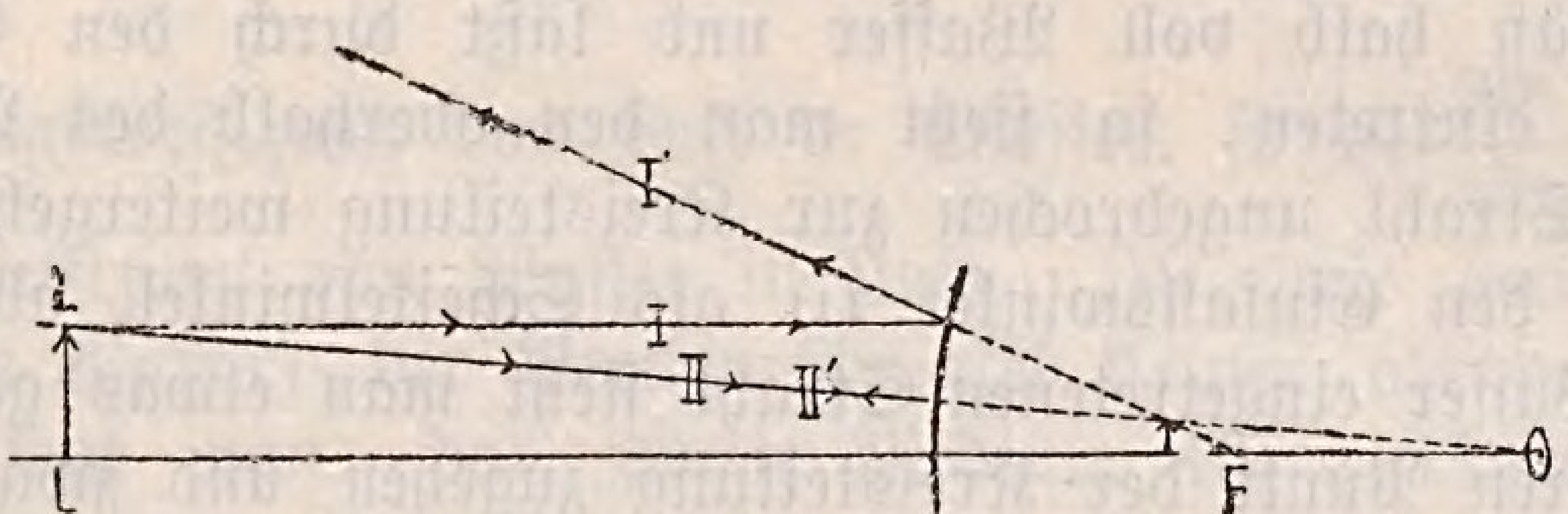


Fig. 252.

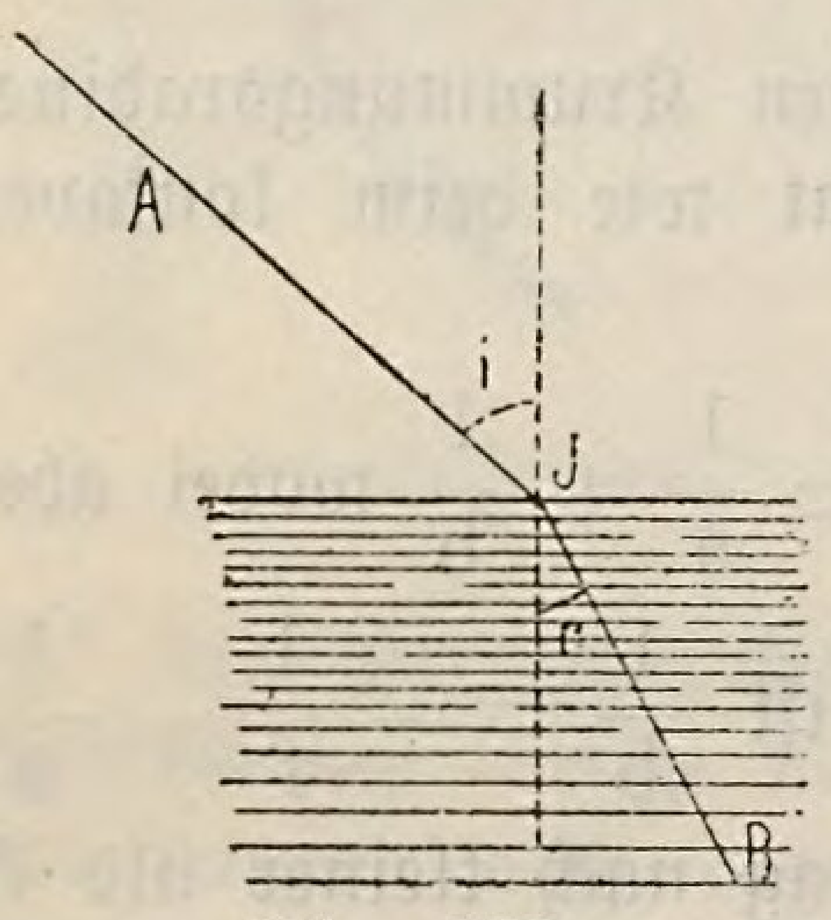
Spiegel befindlichen Auge als solche wahrgenommen werden. Auf dieselbe Weise wie früher können die Bilder auch konstruiert werden. (Fig. 252). Man benützt konvexe Spiegel als kleine, auf Taschenkämmen und ähnlichem angebrachte Toilettespiegel, da man in ihnen trotz ihres kleinen Umfangs doch das ganze Gesicht, wenn auch verkleinert, auf einmal sehen kann. Man stellt auch große spiegelnde Glaskugeln in Gärten, an Aussichtspunkten u. s. w. auf, weil man in ihnen ein sehr hübsches, kleines Bild der ganzen

Umgebung auf einmal sehen kann; naheliegende Gegenstände, z. B. die eigene Figur erscheinen aber darin arg verzerrt.

202. Brechung des Lichtes. Brechungsgesetze.

Wenn das Licht auf die Grenzfläche zweier Stoffe, Medien, trifft, so wird ein Teil desselben reflektiert, der andere Teil dringt in das zweite Medium ein. Ist dasselbe durchsichtig, so geht er im zweiten Medium weiter. Dabei verändert er beim Übergange in das zweite Medium seine Richtung, d. h. er wird gebrochen, erfährt eine Brechung, Refraktion.

Brechungsgesetze: 1) Der einfallende, der gebrochene Strahl und das Einfallslot liegen in einer Ebene, Brechungsebene, die auf der Grenzfläche, der brechenden Fläche, senkrecht steht.


Fig. 253.

2) Das Verhältnis des sinus des Einfallswinkels zum sin. des Brechungswinkels ist für jedes Paar Medien eine Konstante und wird der Brechungskoeffizient oder Brechungsexponent genannt (Descartes 1637).

Zur Erläuterung dieses Satzes diene folgendes: Man nimmt ein flaches Gefäß, dessen eine Wand halbkreisförmig, dessen andere Wand längs des zugehörigen Durchmessers verläuft. Auf der halbkreisförmigen Wand ist eine Kreisteilung angebracht; die gerade Wand besteht aus Glas, ist aber geschwärzt und hat nur in der Mitte einen schmalen, senkrechten, durchsichtigen Spalt. Füllt man dieses Gefäß halb voll Wasser und läßt durch den Spalt einen Lichtstrahl eintreten, so sieht man den oberhalb des Wassers eintretenden Strahl ungebrochen zur Kreisteilung weitergehen, so daß man dort den Einfallswinkel (i) als Scheitelwinkel ablesen kann; den ins Wasser eingetretenen Strahl sieht man etwas gebrochen auf einen anderen Punkt der Kreisteilung zugehen und zwar näher der Mitte des Halbkreises, und kann so den Brechungswinkel (r) ablesen. Zu jedem Einfallswinkel gehört ein gewisser Brechungswinkel; je zwei so zusammengehörige Winkel hängen nun derart zusammen, daß

$$\frac{\sin i}{\sin r} = 1{,}33.$$

Der Brechungsexponent des Wassers ist also 1,33. Nimmt man Öl, so gehört zu jedem Einfallswinkel ein anderer, etwas kleinerer Brechungswinkel, so daß $\frac{\sin i}{\sin r} = 1{,}47$. Untersucht man so alle möglichen brechenden Substanzen, so findet man, daß es für jede eine ganz bestimmte Zahl n, Brechungskoeffizient gibt,

so daß $\frac{\sin i}{\sin r} = n$. **Jede Substanz hat einen besonderen Brechungskoeffizienten.** Ist er groß so sagt man die Substanz bricht das Licht **stark**; ist er klein, d. h. nahe an 1, so bricht sie **schwach**.

Brechungskoeffizienten.

Diamant	2,47—2,75	Olivenöl	1,47
Phosphor	2,22	Schwefelsäure	1,43
Schwefel (kryst.)	2,11	Alkohol	1,37
Rubin	1,78	Äthyläther	1,36
Topas	1,61	Wasser	1,33
Quarz	1,54	Luft	1,00029
Steinsalz	1,54	Sauerstoff	1,00027
Flußspat	1,43	Stickstoff	1,00030
Kronglas	1,53	Wasserstoff	1,00014
Flintglas	1,70	Chlor	1,00077
Schwefelkohlenstoff	1,63	Schwefelkohlenstoffdampf	1,0015
Kanadabalsam	1,53		

Auch wenn das Licht aus einer Substanz (Wasser) in Luft übertritt, so wird es gebrochen und zwar so, daß es ausschaut, als wäre das Licht auf demselben Weg zurückgegangen. **Das Licht legt vorwärts und rückwärts denselben Weg zurück.** Wenn also das Licht (Fig. 253) den Weg AJB von Luft in Wasser macht, so macht es den Weg BJA von Wasser in Luft. Ist also $\frac{\sin i}{\sin r} = n$ der Brechungskoeffizient von Luft in Wasser, so ist $\frac{\sin r}{\sin i} = \frac{1}{n}$ der Brechungskoeffizient von Wasser in Luft. Ist (wie beim Eintritte aus Luft in Wasser) der Brechungswinkel kleiner als der Einfallswinkel, so sagt man: das zweite Medium ist **optisch dichter** als das erste, oder, das Licht wird **zum** Einfallslot gebrochen und der Brechungskoeffizient ist **größer als eins**. Ist (wie beim Austritt von Wasser in Luft) der Brechungswinkel größer als der Einfallswinkel, so sagt man, das zweite Medium ist **optisch dünner** als das erste oder das Licht wird **vom** Einfallslot gebrochen und der Brechungskoeffizient ist **kleiner als eins**.

203. Gang des Lichtes durch Platten.

Geht Licht durch eine von zwei parallelen, ebenen Flächen begrenzte Substanz (Fensterscheibe) und befindet sich vor und hinter der Substanz derselbe Stoff

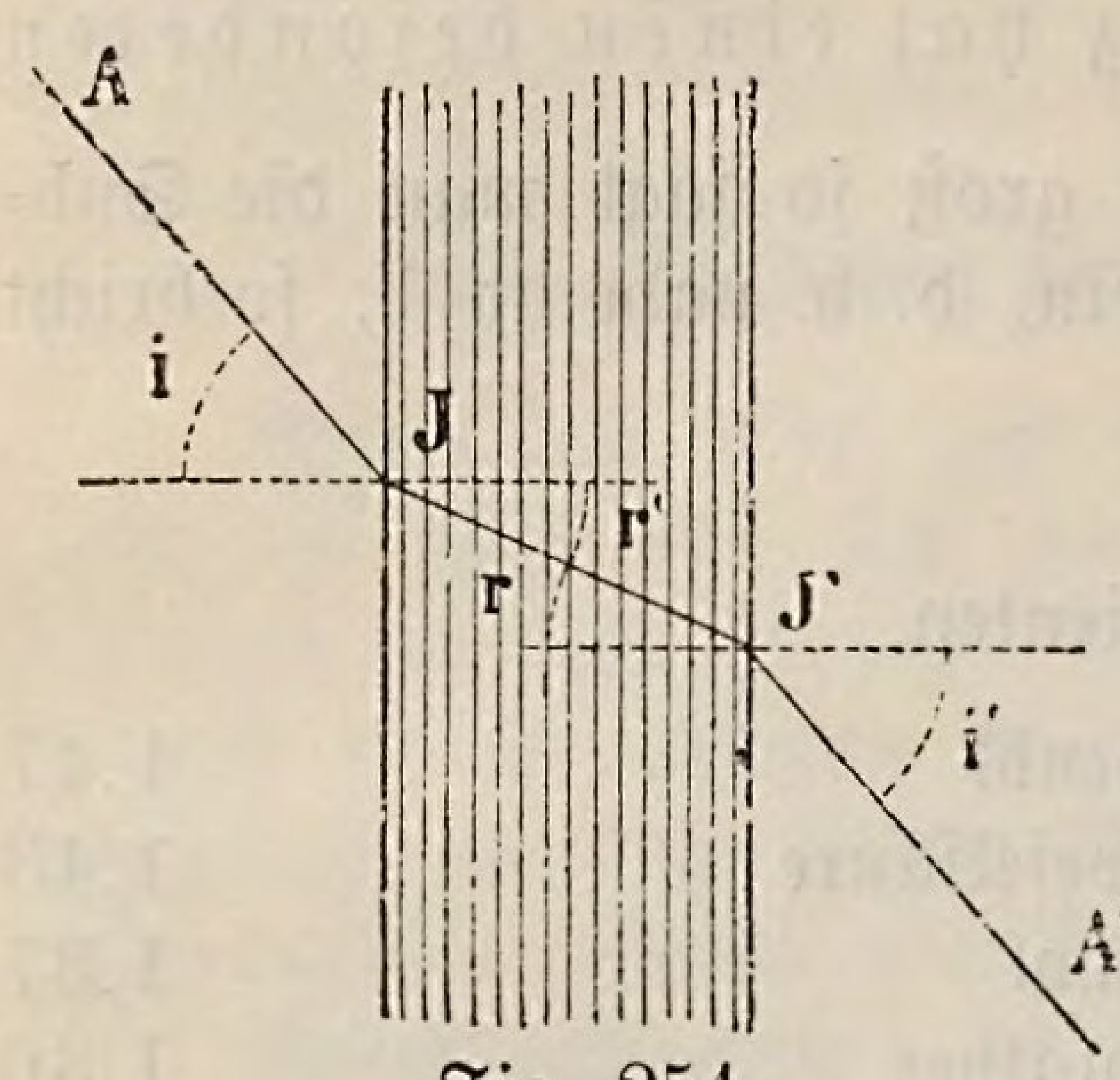


Fig. 254.

(Luft), so hat der austretende Lichtstrahl dieselbe Richtung wie der eintretende, nur ist er ein wenig verschoben. Geht nämlich (Fig. 254) der Strahl AJ aus Luft in Glas, so ist $\frac{\sin i}{\sin r} = n$; nachdem der Strahl von J nach J′ im Glas gegangen ist, tritt er nun aus Glas in Luft, wird also vom Einfallslot gebrochen, so daß $\frac{\sin r'}{\sin i'}$, $= \frac{1}{n} = \frac{\sin r}{\sin i}$; da aber $r' = r$ als Wechselwinkel, so ist auch $i' = i$, also J′A′ ⋕ AJ. Die kleine Verschiebung, welche der Strahl dabei erfährt, ist bei unsern Fensterscheiben wegen ihrer geringen Dicke ganz unbedeutend, bei dicken Glasplatten kann sie leicht wahrgenommen werden, insbesondere wenn man sehr schräg gegen sie sieht (also i groß ist).

Ein in Wasser liegender Gegenstand scheint uns (von oben gesehen) höher zu liegen, als er in Wirklichkeit liegt. Das in A befindliche Auge Fig. 255 sieht den Punkt P nicht in der Richtung AP, sondern der Strahl PJ wird, wenn er von Wasser in Luft geht, vom Einfallslot gebrochen und kommt ins Auge in der Richtung JA; das Auge glaubt daher, der Punkt P befinde sich in der Verlängerung von JA, etwa in P′.

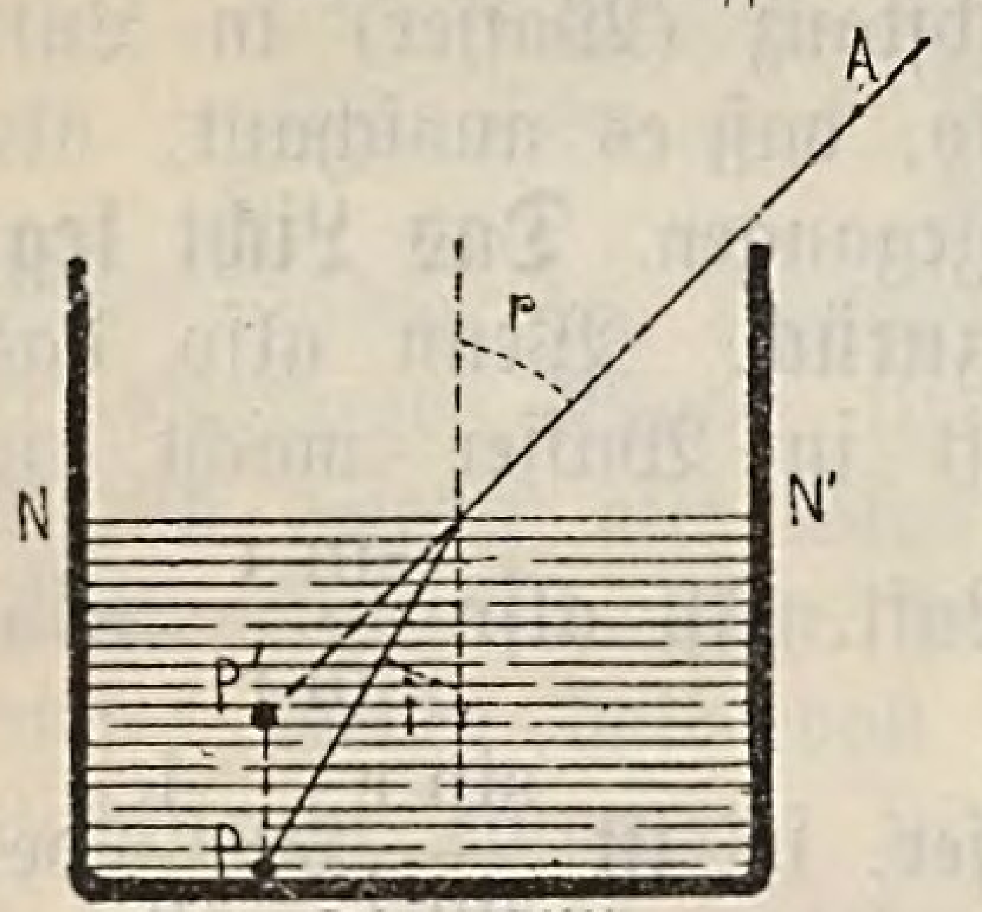


Fig. 255.

Sehr lehrreich ist folgender Versuch (Fig. 255). Man nimmt ein leeres Gefäß (Schüssel ꝛc.) und hält das Auge so, daß es, über den Rand wegblickend, eine auf dem Boden liegende Münze P nicht sehen kann. Man gießt Wasser in das Gefäß, so wird man bei derselben Stellung des Auges die Münze sehen können, wenn man das Gefäß etwa bis NN′ gefüllt hat. Wenn wir in einen klaren Bach oder See vom Ufer aus schräg hineinsehen, so sehen wir die am Boden liegenden Steine höher, halten also auch das Wasser für weniger tief, als es ist. Eine schräg ins Wasser gestellte Stange erscheint gebrochen; man trifft einen Fisch nicht, wenn man in der Richtung auf ihn schießt, in der man ihn sieht; man muß etwas tiefer zielen.

Wir hatten den Satz, daß das Licht beim Durchgang durch eine Platte seine erste Richtung wieder erlangt; es findet sich auch

folgender allgemeinere Satz bestätigt. *Liegen mehrere verschiedene Substanzen hinter einander, so daß sie alle durch parallele, ebene Flächen begrenzt sind, und ist die letzte Substanz dieselbe wie die erste, so hat das Licht in der letzten Substanz wieder dieselbe Richtung wie in der ersten* (Fig. 256). Geht Licht von Luft in Wasser, dann in Glas, dann wieder in Luft, so hat es wieder dieselbe Richtung $AJ \parallel MA'$. Bezeichne ich den Brechungsexponent von Luft in Wasser mit n^L_W, und ähnlich die anderen, so ist $\frac{\sin i}{\sin r} = n^L_W$, $\frac{\sin r}{\sin r'} = n^W_G$, $\frac{\sin r'}{\sin i} = n^G_L$, also durch Multiplikation:

$$n^L_W \cdot n^W_G \cdot n^G_L = 1; \text{ oder da } n^G_L = 1 : n^L_G,$$

so ist $n^L_W \cdot n^W_G = n^L_G$.

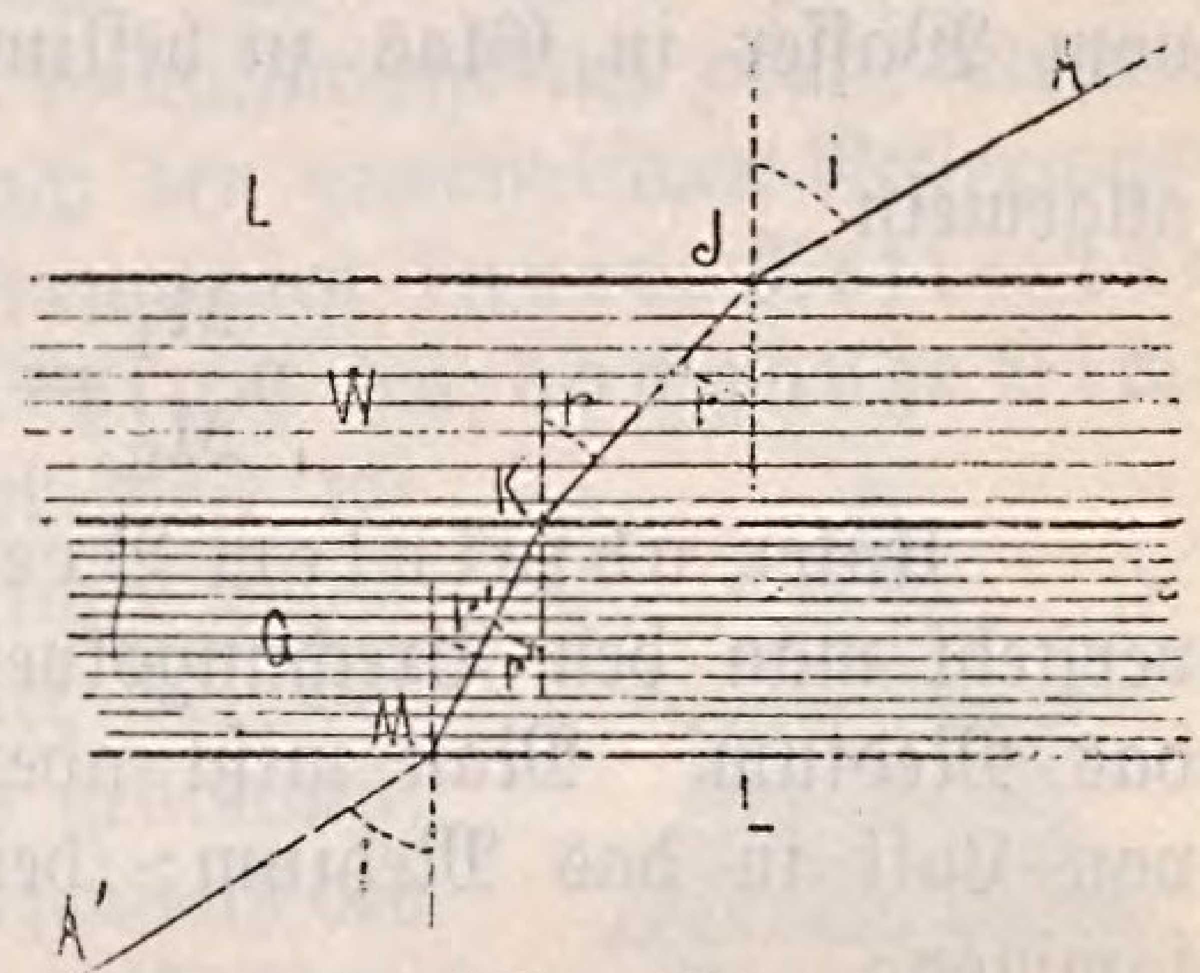


Fig. 256.

Aus diesem Satze folgt: Geht Licht aus einem Medium I (Luft) durch mehrere, parallel begrenzte Medien in ein Medium II, so hat es in Medium II dieselbe Richtung, wie wenn es direkt vom Medium I in das Medium II gegangen wäre; z. B. der aus Luft durch Wasser in Glas gegangene Strahl KM hat dieselbe Richtung, wie wenn er direkt aus Luft in Glas gegangen wäre.

204. Atmosphärische Strahlenbrechung.

Das Licht der Himmelskörper geht aus dem leeren Weltraum (aus dem Äther) in die atmosphärische Luft und wird dabei gebrochen. Die Luft ist nach oben zu immer dünner; denken wir uns dieselbe in horizontale Schichten zerlegt, so trifft der Lichtstrahl zuerst die oberste, dünnste und wird ein klein wenig abgelenkt; dann tritt er aus der obersten in die nächste, etwas dichtere, wird wieder etwas zum Einfallslot gebrochen u. s. f.; er beschreibt also, von Schichte zu Schichte gehend, eine krummlinige Bahn; *die Richtung, die er schließlich hat, ist dieselbe, wie wenn er direkt aus dem Äther in die unterste Schichte der Luft übergetreten wäre.*

Man nennt diese Ablenkung die *atmosphärische Strahlenbrechung* oder *atmosphärische Refraktion*. Sie bewirkt, daß wir die Gestirne *höher* sehen, als sie in Wirklichkeit stehen, besonders wenn sie noch nahe am Horizonte stehen; da hiebei auch

noch die Kugelgestalt der Erde mitwirkt, so kommt es, daß wir Sonne und Mond sogar schon sehen, wenn sie noch unter dem mathematischen Horizonte liegen, oder daß wir sie noch sehen, wenn sie schon untergegangen sind. In besonders günstigen Fällen ist es sogar möglich, bei einer totalen Mondsfinsternis den verfinsterten, eben aufgehenden Mond und die eben untergehende Sonne zugleich zu sehen (Galileische Mondsfinsternis). Der Mond ist deshalb auch bei totaler Verfinsterung, wenn er sich also vollständig im Kernschatten der Erde befindet, nicht ganz finster, da etwas von dem Sonnenlichte, das durch die Erdatmosphäre aus seiner Bahn abgelenkt wird, auf ihn trifft; es gibt ihm das oft ein blutrotes Ansehen.

Obiger Satz über den Gang des Lichtes durch parallele Schichten gibt auch ein Mittel, um den Brechungskoeffizienten etwa vom Wasser in Glas zu bestimmen, denn es ist $n_{\frac{W}{G}} = n_{\frac{W}{L}} \cdot n_{\frac{L}{G}}$, allgemein

$$n_{\frac{M_1}{M_2}} = n_{\frac{M_1}{L}} \cdot n_{\frac{L}{M_2}}.$$

Unter absolutem Brechungskoeffizient eines Mediums versteht man den Brechungskoeffizient vom leeren Raum (Äther) in das Medium. Man mißt aber gewöhnlich den Brechungskoeffizient von Luft in das Medium; beide hängen durch die Gleichung zusammen:

$$n_{\frac{\text{Äther}}{\text{Stoff}}} = n_{\frac{\text{Ähter}}{\text{Luft}}} \cdot n_{\frac{\text{Luft}}{\text{Stoff}}}.$$

205. Grenzwinkel. Totale Reflexion.

Geht Licht vom dünneren ins dichtere Medium, so wird es zum Einfallslot gebrochen, der Brechungswinkel ist kleiner als der Einfallswinkel. Zum Einfallswinkel von 90° gehört ein Brechungswinkel r, bestimmt aus $\frac{\sin 90}{\sin r} = n$, also $\sin r = \frac{1}{n}$; dies ist der größte Winkel, unter dem das Licht in das zweite Medium gelangt, er wird deshalb auch Grenzwinkel genannt. Dringt etwa Licht bloß durch eine kleine Öffnung in das zweite Medium, so wird das von allen Seiten her einfallende Licht in einen Lichtkegel vereinigt, dessen Kante mit der Achse den Grenzwinkel bildet (Strahl 6 in Fig. 257); jenseits dieses Winkels dringt kein Licht in das zweite Medium. Umgekehrt, wenn Licht aus dem dichteren in das dünnere Medium geht, so wird es vom Einfallslote gebrochen, der Brechungswinkel ist größer als der Einfallswinkel; da aber der Brechungswinkel höchstens 90° sein kann,

und hiezu ein Einfallswinkel i gehört, so daß $\frac{\sin i}{\sin 90} = \frac{1}{n}$, also $\sin i = \frac{1}{n}$, so folgt, daß alles Licht, das unter einem noch größeren Einfallswinkel auffällt, gar nicht mehr in das dünnere Medium gelangt. Auch dieser Winkel wird Grenzwinkel genannt und ist derselbe wie der vorher so benannte. Der Grenzwinkel beträgt in Diamant (gegen Luft) 23⁰, Quarz 40⁰ 29′, Flintglas 36⁰, Kronglas 40⁰ 49′, Wasser 48⁰ 45′, und in Luft (gegen den luftleeren Raum) 88⁰ 24′. Alles jenseits des Grenzwinkels auffallende Licht wird, da es nicht mehr ins zweite dünnere Medium gelangen kann, reflektiert nach den gewöhnlichen Reflexionsgesetzen (Strahl 7 in Fig. 257). Man nennt dies innere Reflexion oder totale (vollständige) Reflexion, da das ganze Licht reflektiert wird. Man beobachtet diese totale Reflexion leicht an einem dreiseitigen Glasprisma (Fig. 258). Das Licht tritt bei der ersten Prismenfläche ein, wird etwas gebrochen, trifft so die untere Fläche, und wird, da es jenseits des Grenzwinkels auffällt, total reflektiert, trifft dann die dritte Prismenfläche, wird etwas gebrochen und kommt so ins Auge. Das Auge sieht daher die jenseits des Prismas liegenden Gegenstände in der unteren Prismenfläche gespiegelt, und zwar sehr stark gespiegelt, d. h. sehr lichtstark, da alles auffallende Licht reflektiert wird; es sieht aus, als wenn die untere Prismenfläche aus Metall, Quecksilber wäre. Hält man ein leeres Reagenzgläschen schräg ins Wasser (Fig. 259) und blickt von oben auf dasselbe, so werden die von der Seite (vom Fenster) her einfallenden Lichtstrahlen total reflektiert. Deshalb spiegeln und glänzen auch Luftbläschen im Wasser so stark.

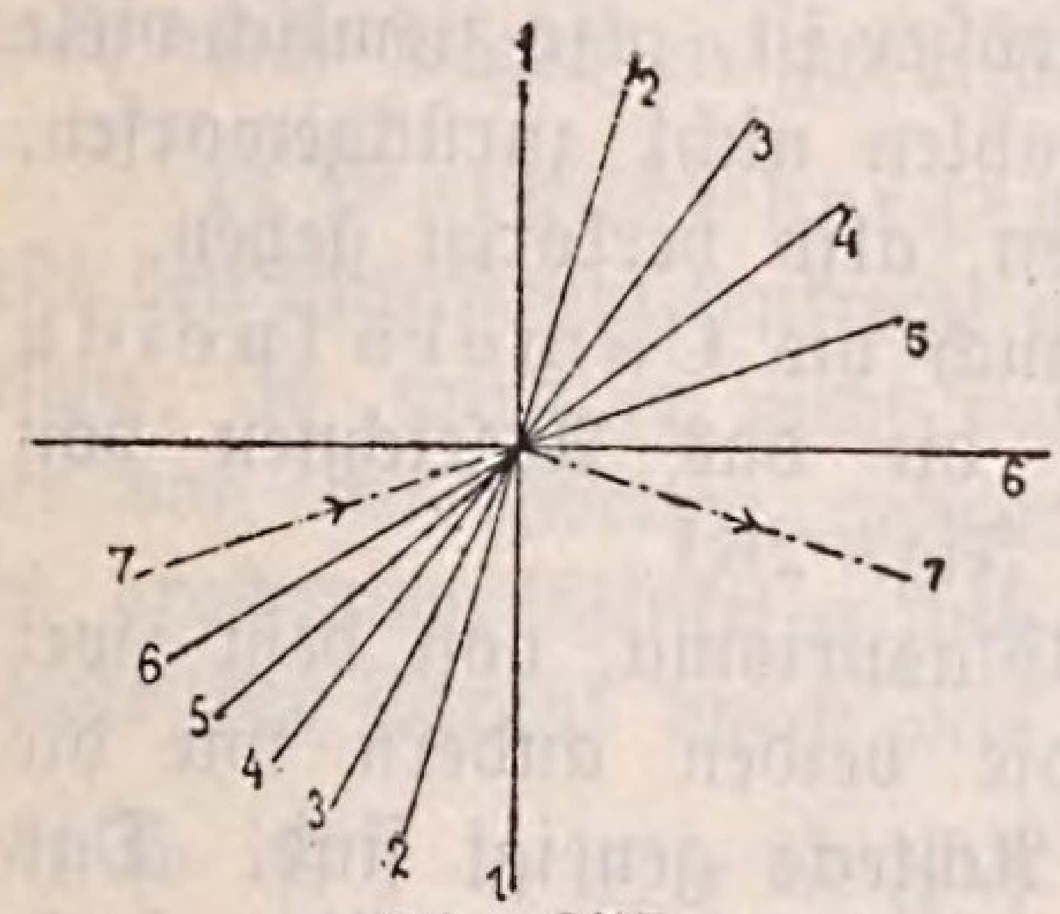


Fig. 257.

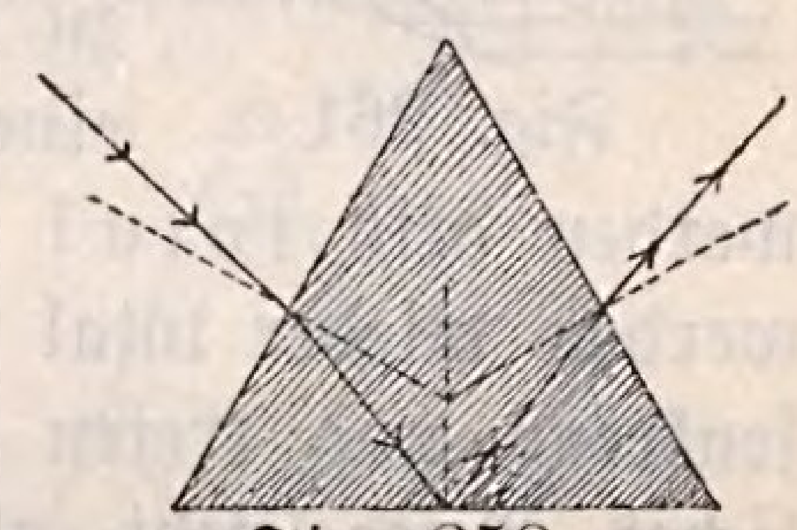


Fig. 258.

Diamant hat einen sehr großen Brechungsexponenten; deshalb ist der Grenzwinkel sehr klein. Diamanten werden geschliffen, so daß sie die Form zweier mit den Grundflächen auf einander sitzenden Pyramiden haben (Fig. 260), die obere ist stumpfer, die untere spitzer. Fast alles oben einfallende Licht trifft nun die unteren Flächen meist so, daß es jenseits des Grenzwinkels auffällt, also total reflektiert und bei den oberen Flächen

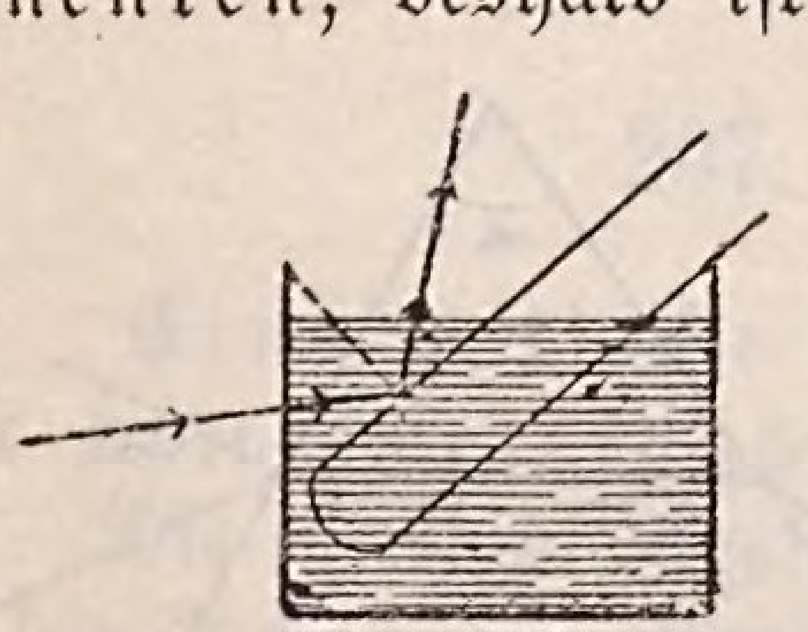
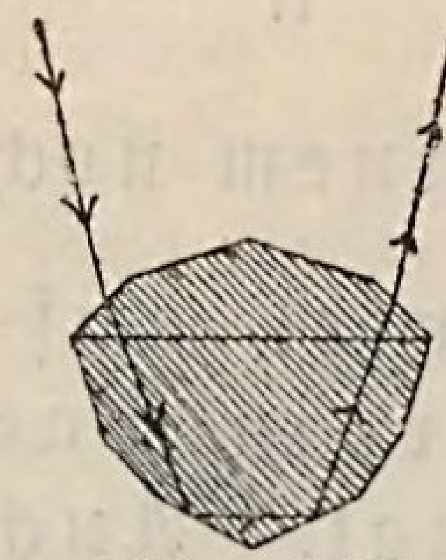


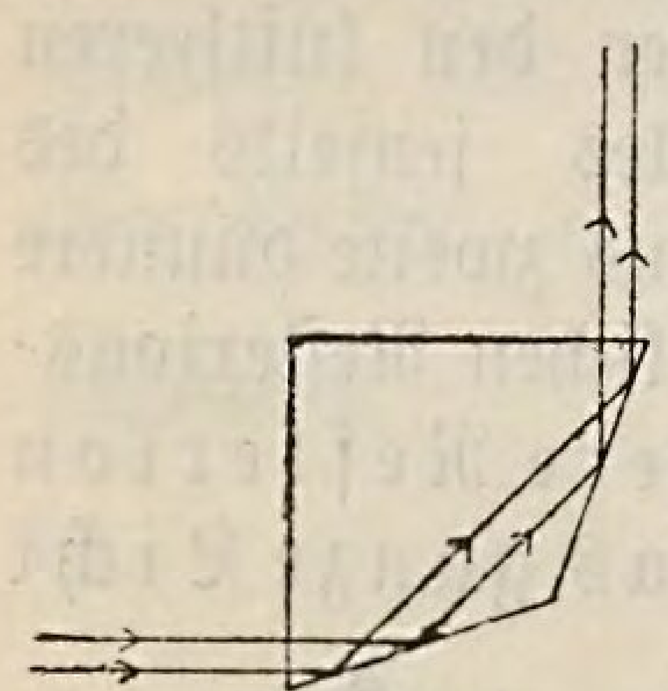
Fig. 259.

wieder in die Luft zurückgeworfen wird; auf diesem Zurückwerfen alles auf ihn fallenden Lichtes beruht das Blitzen, Funkeln, Brillieren des Diamanten; schleift man Glas, Bergkrystall u. s. w. ebenso wie Diamant, so fehlt diesen viel von dem Feuer desselben, weil der Grenzwinkel dieser Stoffe größer ist, also ziemlich viele der unten auffallenden Strahlen nicht zurückgeworfen, sondern durchgelassen werden, also verloren gehen.


Fig. 260.

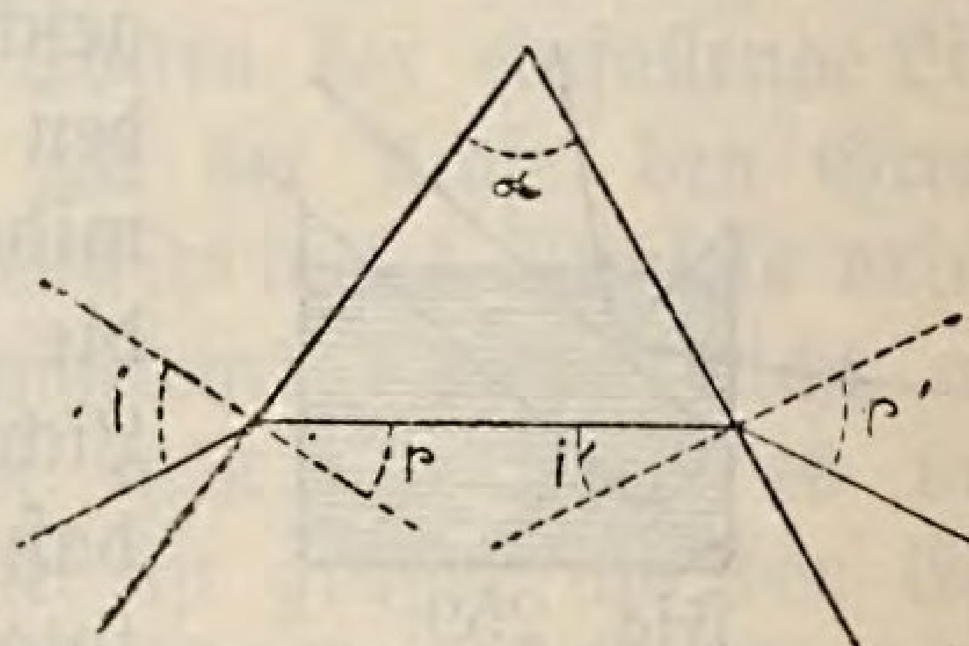
Auf der totalen Reflexion beruht auch die Cameralucida (oder camera clara) von Wollaston, die das Abzeichnen von Gegenständen erleichtert, Zeichenprisma. Fig. 261.

Sie besteht aus einem vierseitigen Glasprisma, von dem zwei Flächen auf einander senkrecht stehen, die beiden andern wie die Seiten eines regulären Achtecks geneigt sind. Das Prisma wird so gestellt, daß eine der beiden senkrechten Flächen dem Gegenstande zugekehrt, also nahezu vertikal ist, die andere oben und horizontal steht. Die Lichtstrahlen vom Gegenstande dringen durch die vertikale Fläche (ohne wesentlich gebrochen zu werden) ein, treffen die eine schräge Seite unter einem Winkel, der größer ist als der Grenzwinkel, werden also total reflektiert, so treffen sie die zweite schräge Seite, werden wieder total reflektiert; treffen dann auf die obere Fläche fast senkrecht und treten dort aus dem Prisma aus. Ein oben befindliches Auge sieht also das Spiegelbild des Gegenstandes unten. Wird dieses Prisma auf einem stabförmigen Träger befestigt, und dieser an ein Zeichenbrett angeschraubt, so sieht das Auge das Spiegelbild unter sich auf der Papierfläche. Man muß nun das Auge recht nahe an die Kante des Prismas halten, so daß man mit der einen Hälfte des Auges das Spiegelbild des Gegenstandes und mit der andern Hälfte des Auges, am Prisma vorbeischauend, zugleich das Papier unten und die Spitze des Bleistiftes sieht; dann kann man mit dem Stifte die Umrisse des Bildes (bei einiger Übung) leicht und richtig nachfahren und so mechanisch den Gegenstand abzeichnen.


Fig. 261.

206. Brechung durch ein Prisma.

Ist ein durchsichtiger Stoff von zwei gegen einander geneigten Flächen begrenzt, so nennt man ihn ein optisches Prisma (Fig. 262). Trifft der Lichtstrahl unter dem Winkel i die erste Fläche, so wird er unter dem Winkel r gebrochen, so daß $\frac{\sin i}{\sin r} = n$; er trifft dann unter dem Winkel i′ ($= \alpha - r$) die zweite Fläche, wird dort nochmals gebrochen, so daß $\frac{\sin i'}{\sin r'} = \frac{1}{n}$,


Fig. 262.

hat also beim Austritte aus dem Prisma eine ganz andere Richtung als beim Eintritte: der Lichtstrahl ist durch das Prisma abgelenkt worden. Man nennt den Winkel α den brechenden Winkel des Prismas, und benützt solche Prismen zur Bestimmung des Brechungskoeffizienten der Substanz, aus der sie hergestellt sind, und zwar nach folgenden zwei Methoden:

1) Methode der senkrechten Inzidenz (Fig. 263). Man läßt den Lichtstrahl senkrecht auf die erste Fläche fallen, so wird er nicht von dieser, sondern nur von der zweiten gebrochen. Man mißt den brechenden Winkel α und die Ablenkung δ, welche der Strahl durch das Prisma erfahren hat, so ist $i = \alpha$, $r = \alpha + \delta$, also $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{1}{n}$, also $n = \frac{\sin(\alpha + \delta)}{\sin \alpha}$.

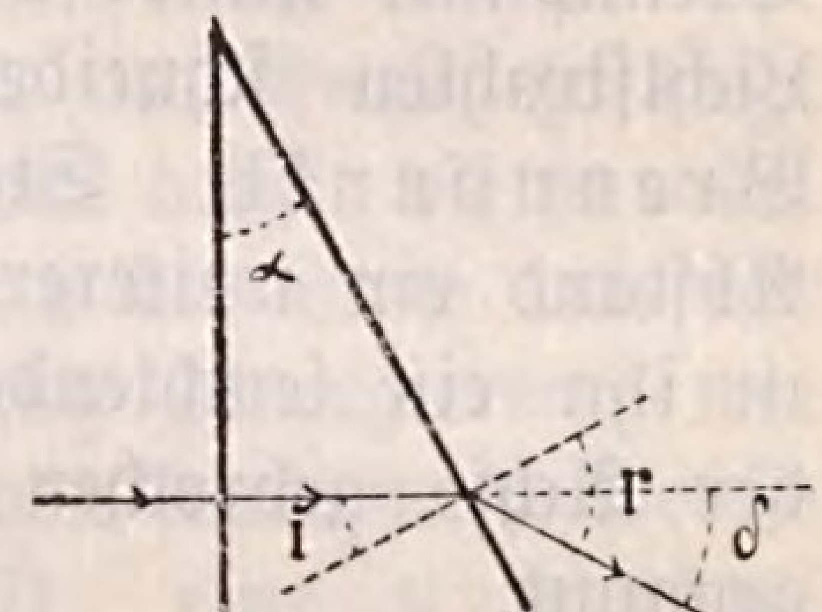


Fig. 263.

2) Methode durch das Minimum der Ablenkung (Fig. 264). Stellt man das Prisma so, daß der Lichtstrahl beim Ein- und Austritt gleiche Winkel mit den Prismenflächen macht, so findet man, daß er dann gerade am wenigsten abgelenkt ist; dreht man das Prisma ein wenig nach der einen oder anderen Seite, so wird der Lichtstrahl stärker abgelenkt. Man kann es also auch durch Drehen des Prismas leicht dahin bringen, daß der Lichtstrahl gerade am wenigsten abgelenkt ist, das Minimum der Ablenkung zeigt. Man mißt den brechenden Winkel α des Prismas und diese Ablenkung δ, so ist $\frac{\sin i}{\sin r} = n$, aber $i = \frac{\alpha}{2} + \frac{\delta}{2}$, $r = \frac{\alpha}{2}$, also $n = \frac{\sin \frac{1}{2}(\alpha + \delta)}{\sin \frac{1}{2}\alpha}$.

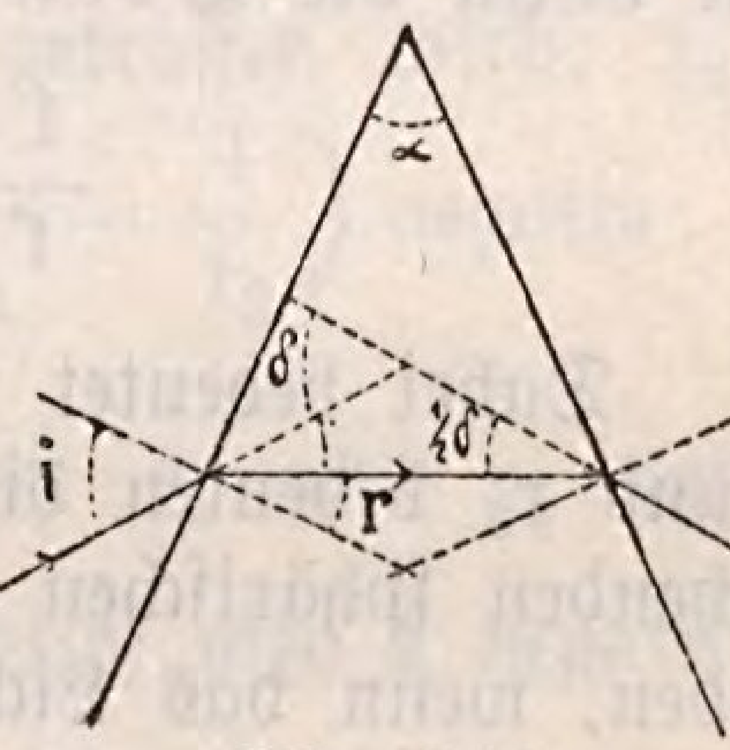


Fig. 264.

Sphärische Linsen.

207. Brennpunkt der Linsen.

Eine optische Linse ist ein durchsichtiger Stoff, der von zwei sphärisch gekrümmten Flächen begrenzt ist. Die Verbindungslinie der Mittelpunkte beider Krümmungen ist die Achse der Linse.

Die einfachsten und gebräuchlichsten sind die Glaslinsen.

Fallen Lichtstrahlen parallel der Axe auf eine Linse, so werden sie so gebrochen, daß sie alle durch ein und denselben Punkt der Achse gehen, was leicht durch Versuche bestätigt werden kann. Dieser Punkt heißt Brennpunkt, Fokus, sein Abstand von der Linse heißt Brennweite, Fokaldistanz.

Ist die Linse in der Mitte dicker als am Rand, so liegt der Brennpunkt hinter der Linse, ist ein reeller Brennpunkt, d. h. die Lichtstrahlen schneiden sich wirklich in ihm; er heißt der erste Brennpunkt. Stets findet sich dann vor der Linse in gleichem Abstand ein weiterer Punkt, welcher die Eigenschaft hat, daß, wenn in ihn ein leuchtender Punkt gebracht wird, die Strahlen parallel der Achse gebrochen werden. Er wird zweiter Brennpunkt genannt.

Solche Linsen heißen positive Linsen, Brenngläser oder Sammellinsen.

Durch ein im Paragraph 210 angegebenes Näherungsverfahren kann man ableiten, daß die Brennweite f berechnet werden kann durch die Brennpunktsgleichung:

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right).$$

Dabei bedeutet n den Brechungskoeffizient der Linsensubstanz, r_1 und r_2 bedeuten die Krümmungsradien der ersten und der zweiten brechenden sphärischen Fläche, und jeder soll als positiv genommen werden, wenn das Licht die konvexe Seite der Krümmung trifft.

Ergibt sich aus dieser Gleichung f als positiv, so hat man eine positive oder Sammellinse.

Solche positive Linsen sind (Fig. 265):

1) Die bikonvexe: Bei ihr ist r_1 positiv, weil das Licht die konvexe Seite der ersten Fläche trifft, r_2 ist negativ, weil das Licht die konkave Seite der zweiten Fläche trifft, also ist $-\frac{1}{r_2}$ auch positiv; demnach ist $(n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$ positiv; also f ist positiv.

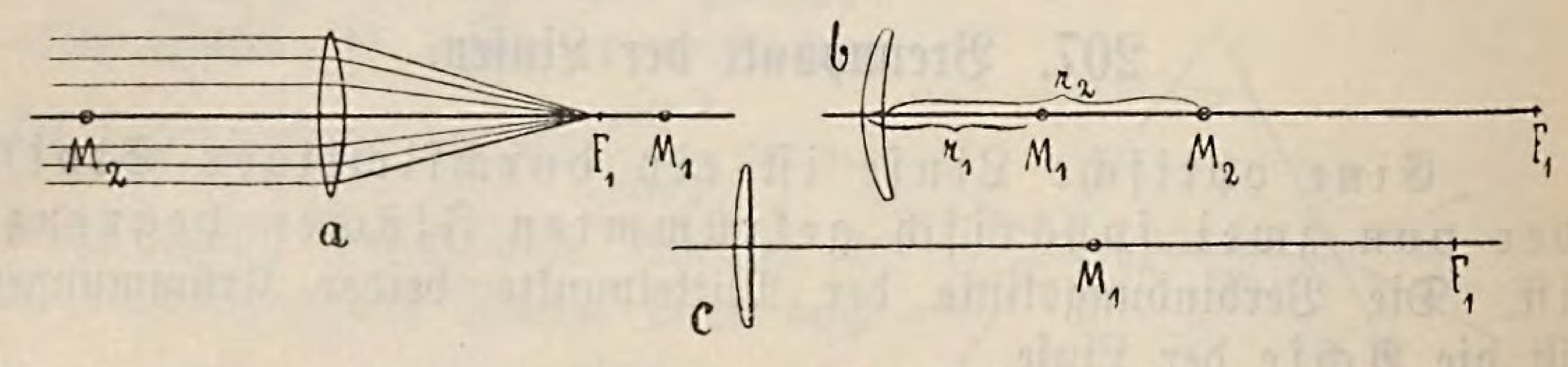


Fig. 265.

2) Die konkavkonvexe: Bei ihr ist $r_1 = +$, $r_2 = +$, und $r_1 < r_2$, also $\frac{1}{r_1} > \frac{1}{r_1}$; also ist die Differenz $\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}$ positiv, also ist f positiv.

3) Die plankonvexe, bei der die eine Fläche eben ist, so daß $r_2 = \infty$, $\frac{1}{r_2} = 0$ zu setzen ist; r_1 ist positiv, somit f positiv.

Alle positiven Linsen sind in der Mitte dicker als am Rande.

Ist die Linse in der Mitte dünner als am Rand, so liegt der erste Brennpunkt vor der Linse; das heißt: die parallel der Achse auffallenden Lichtstrahlen werden durch die Linse von der Achse weggelenkt, so daß sie nach der Brechung divergieren, wie wenn sie von einem vor der Linse liegenden Punkte herkämen. Solche Linsen haben einen virtuellen Brennpunkt, eine negative Brennweite, heißen negative Linsen oder Zerstreuungsgläser. Der zweite Brennpunkt liegt hinter der Linse.

Solche negative Linsen, bei welchen sich aus der Gleichung f als negativ ergibt, sind:

1) Die bikonkave: bei ihr ist r_1 negativ, weil die erste Fläche auf der konkaven Seite vom Lichte getroffen wird; r_2 ist positiv, aber $\frac{1}{r_2}$ wird subtrahiert, also ist $\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$ negativ, somit f negativ.

2) Die konvexkonkave: bei ihr ist r_1 und r_2 positiv, aber $r_1 > r_2$, $\frac{1}{r_1} < \frac{1}{r_2}$, also $\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}$ negativ, also f negativ.

3) Die plankonkave: bei ihr ist eine Fläche eben, also etwa $r_1 = -$ und $r_2 = \infty$, also $\frac{1}{r_2} = 0$, also $\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) = -\frac{1}{r_1}$, also negativ, somit f negativ.

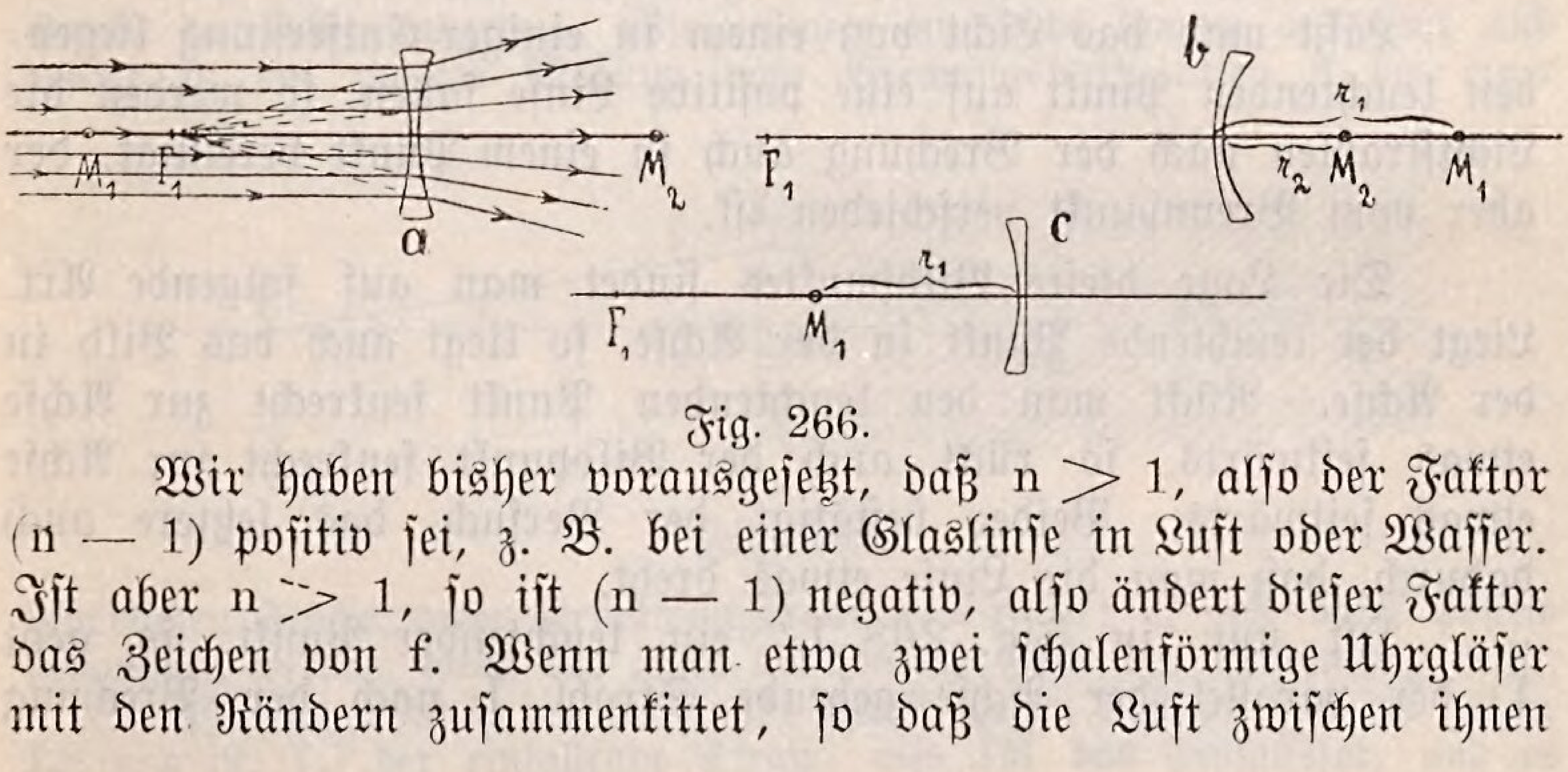


Fig. 266.

Wir haben bisher vorausgesetzt, daß $n > 1$, also der Faktor $(n - 1)$ positiv sei, z. B. bei einer Glaslinse in Luft oder Wasser. Ist aber $n > 1$, so ist $(n - 1)$ negativ, also ändert dieser Faktor das Zeichen von f. Wenn man etwa zwei schalenförmige Uhrgläser mit den Rändern zusammenkittet, so daß die Luft zwischen ihnen

die Form einer positiven Linse hat, und diese nun ins Wasser taucht, so wirkt sie dort wie eine negative Linse; ebenso eine linsenförmige Luftblase in Glas, wie man sie in Fensterscheiben findet.

208. Größe der Brennweite.

Soll eine Linse eine sehr kurze Brennweite haben, also f klein sein, so gibt man dem r_1 und r_2 verschiedene Zeichen, so daß ihre Werte addiert werden (also bikonvex oder bikonkav) und sucht r_1 und r_2 möglichst klein zu machen. Dann muß aber auch die Linse sehr klein sein. Linsen von kurzer Brennweite haben meist entgegengesetzt gerichtete Krümmungsflächen, sehr kleine Krümmungsradien und können nicht groß sein (Fig. 267).

Soll die Linse eine große Brennweite haben, also f groß sein, so macht man die Krümmungsradien r_1 und r_2 beide sehr groß. Hiebei ist es möglich, die Linse selbst groß zu machen, ohne daß ihre Dicke verhältnismäßig zu groß wird. Linsen von großer Brennweite haben sehr große Krümmungsradien und können (aber müssen nicht) groß sein.

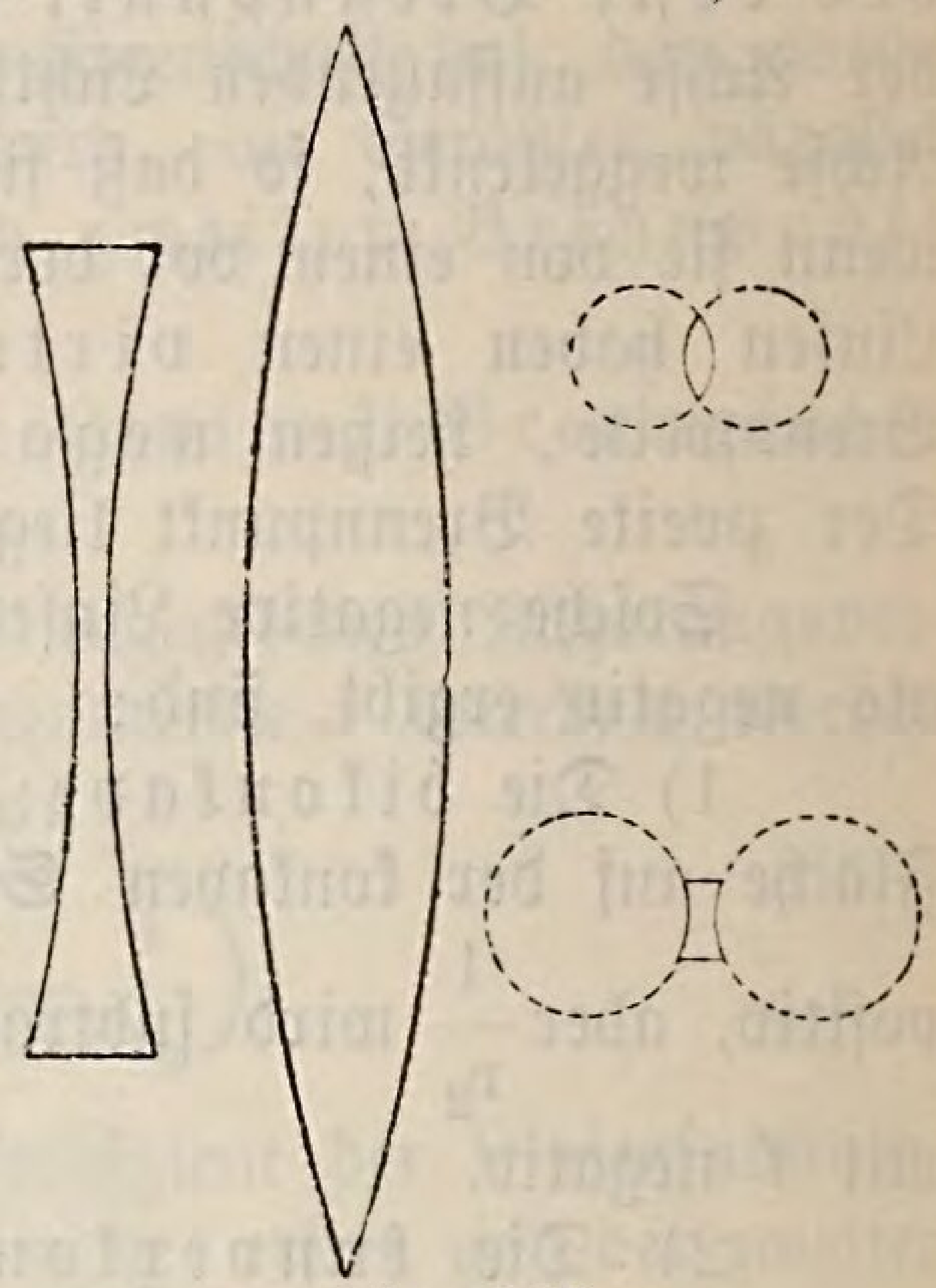


Fig. 267.

Brennversuche wurden bald nach Erfindung der Brenngläser gemacht; Mariotte machte positive Linsen aus Eis und entzündete damit Schießpulver; Tschirnhaus machte Linsen von 90 *cm* Durchmesser und 4,34 *m* Brennweite, in deren Brennpunkt alle Metalle schmolzen, Wasser ins Kochen kam und die Verbrennlichkeit des Diamanten nachgewiesen wurde (1687). Für optische Zwecke waren diese Linsen ganz unbrauchbar, denn sie waren voll „Schlieren".

209. Ableitung der Bildgleichung.

Läßt man das Licht von einem in einiger Entfernung liegenden leuchtenden Punkt auf eine positive Linse fallen, so werden die Lichtstrahlen nach der Brechung auch in einem Punkt vereinigt, der aber vom Brennpunkt verschieden ist.

Die Lage dieses Bildpunktes findet man auf folgende Art. Liegt der leuchtende Punkt in der Achse, so liegt auch das Bild in der Achse. Rückt man den leuchtenden Punkt senkrecht zur Achse etwas seitwärts, so rückt auch der Bildpunkt senkrecht zur Achse etwas seitwärts. Beides bestätigt der Versuch, das letztere auch dadurch, daß man die Linse etwas dreht.

Ist nun in Fig. 268 L' ein leuchtender Punkt, so geht 1) der parallel der Achse gehende Strahl I nach der Brechung

durch den ersten Brennpunkt F_1; 2) der durch die Mitte der Linse gehende Strahl II geht ungebrochen durch, da er dort, besonders wenn man die Dicke der Linse sehr klein nimmt, parallele Flächen trifft. Der Schnittpunkt B′ beider Strahlen bestimmt somit die Lage des Bildpunktes B′, welcher dem leuchtenden Punkte L zugehört. Somit ist auch B das Bild von L.

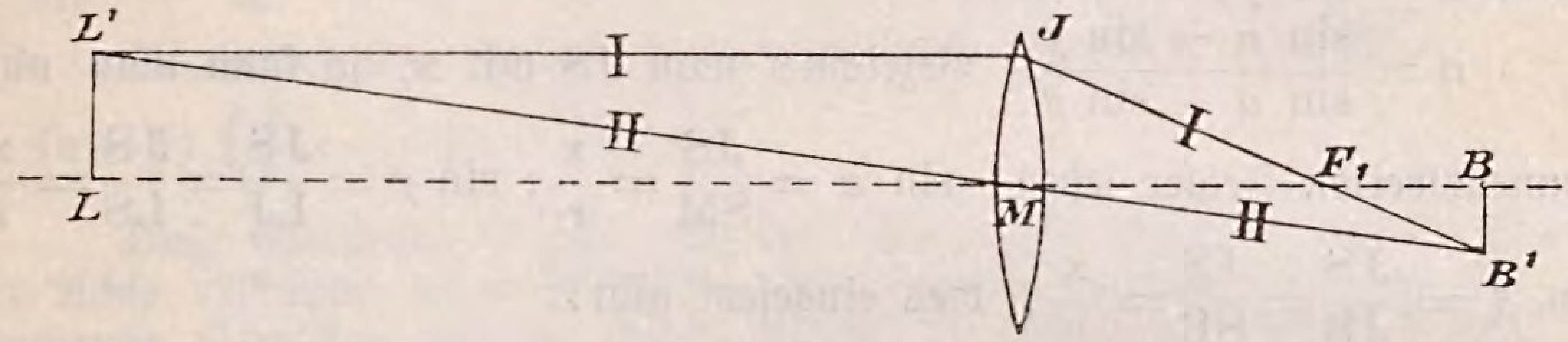


Fig. 268.

Bezeichnet man den Abstand des leuchtenden Punktes von der Linse, LM, mit a, den Abstand des Bildpunktes B von der Linse, BM, mit b, die Brennweite F_1 M mit f, so ist

$\triangle B'BM \sim \triangle L'LM$, also $BB' : LL' = b : a$; ferner

$\triangle B'BF_1 \sim \triangle JMF_1$, also $BB' : MJ = b - f : f$; da nun

$LL' = MJ$, so folgt durch Vergleichung:

$b : a = b - f : f$; hieraus

$a(b - f) = bf$, oder

$ab - af = bf$, oder

$ab = bf + af$. Dividiert man beiderseits mit abf, so wird

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}. \quad \text{(Bildpunktsgleichung.)}$$

210. Direkte Ableitung der Bildgleichung.

Wir untersuchen den Gang der Lichtstrahlen, welche von einem Punkte der Achse ausgehen. Wir nehmen an, Licht komme aus Luft und dringe in ein zweites Medium vom Brechungskoeffizienten n bei einer

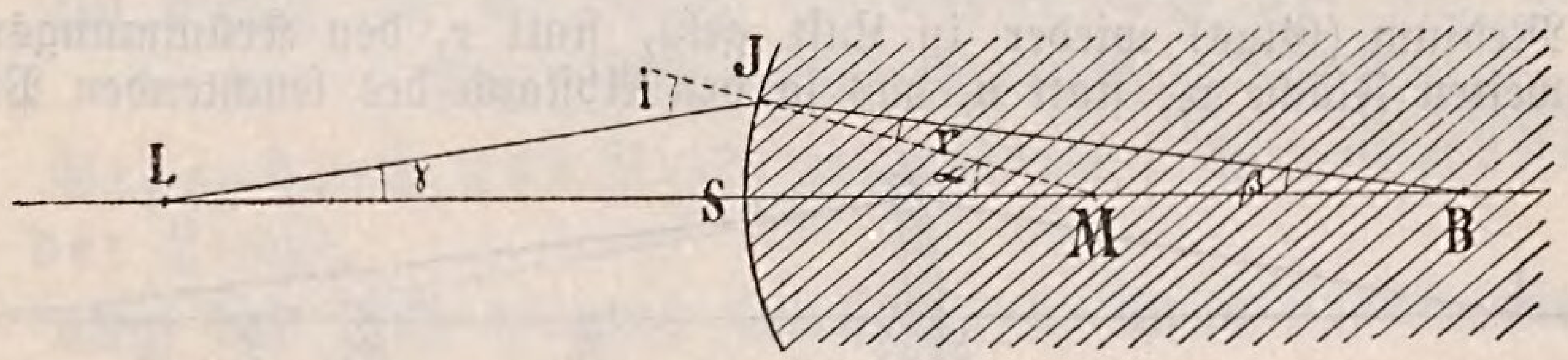


Fig. 269.

sphärischen Fläche, deren Krümmungsradius $= r_1$ ist; r_1 soll dann positiv genommen werden, wenn das Licht die konvexe Seite der Krümmung trifft.

Ist (Fig. 269) L der leuchtende Punkt, dessen Abstand von der Fläche $LS = a$ ist, LJ der einfallende Strahl, also JM das Einfallslot, und es

sei JB der gebrochene Strahl, der die Achse in B schneidet, so daß SB = b ist; dann ist:

$$n = \frac{\sin i}{\sin r}; \text{ da } i = \alpha + \gamma,\ r = \alpha - \beta, \text{ so ist}$$

$$n = \frac{\sin(\alpha + \gamma)}{\sin(\alpha - \beta)}.$$

Berücksichtigen wir nur Zentralstrahlen, so sind alle diese Winkel α, β, γ, sehr klein, so daß man ohne nennenswerten Fehler setzen kann $\sin(x \pm y) = \sin x \pm \sin y$; es ist dann:

$$n = \frac{\sin \alpha + \sin \gamma}{\sin \alpha - \sin \beta}.$$ Bezeichnet man JS mit x, so kann man ohne nennenswerten Fehler setzen: $\sin \alpha = \frac{JS}{SM} = \frac{x}{r_1}$; $\sin \gamma = \frac{JS}{LJ} = \frac{JS}{LS} = \frac{x}{a}$, $\sin \beta = \frac{JS}{JB} = \frac{JS}{SB} = \frac{x}{b}$; dies eingesetzt gibt:

$$n = \frac{\frac{x}{r_1} + \frac{x}{a}}{\frac{x}{r_1} - \frac{x}{b}}; \quad n = \frac{b(a + r_1)}{a(b - r_1)}, \text{ oder}$$

$$abn - anr_1 = ab + br_1; \quad (n - 1)\,ab - br_1 = anr_1;$$

dividiert man mit abr_1, so ist:

$$\text{A)}\quad \frac{n}{b} = \frac{n - 1}{r_1} - \frac{1}{a}.$$

Aus dieser Gleichung kann man, wenn a, n, r_1 bekannt sind, b berechnen; da in ihr die Größe x = JS nicht mehr vorkommt, so erkennt man, daß alle von L ausgehenden Strahlen nach der Brechung durch denselben Punkt B gehen, gleichgültig, wo sich J befindet. Gehen Lichtstrahlen vom Punkte L aus, so schneiden sie sich nach der Brechung alle (mit sehr großer Genauigkeit) in demselben Punkte B, dessen Abstand b von der Fläche durch die Gleichung A gefunden werden kann.

Bei einer Linse verläuft aber das eingedrungene Licht nicht lange im Innern des Mediums (Glas), sondern tritt bald wieder in die Luft aus, indem es nochmals gebrochen wird. Wir betrachten den Gang der Lichtstrahlen nach dieser zweiten Brechung (Fig. 270). Wir wissen schon, daß die Lichtstrahlen, da sie auch wieder durch eine sphärische Fläche gehen, sich nach der Brechung in einem Punkte der Achse schneiden, dessen Abstand von der Fläche S'B = b' aus A berechnet werden kann. Man hat dazu in Gleichung A zu setzen: Statt n, $\frac{1}{n}$, da das Licht diesmal aus dem Medium (Glas) wieder in Luft geht, statt r_1 den Krümmungsradius der zweiten Fläche r_2; statt a, das ja den Abstand des leuchtenden Punktes

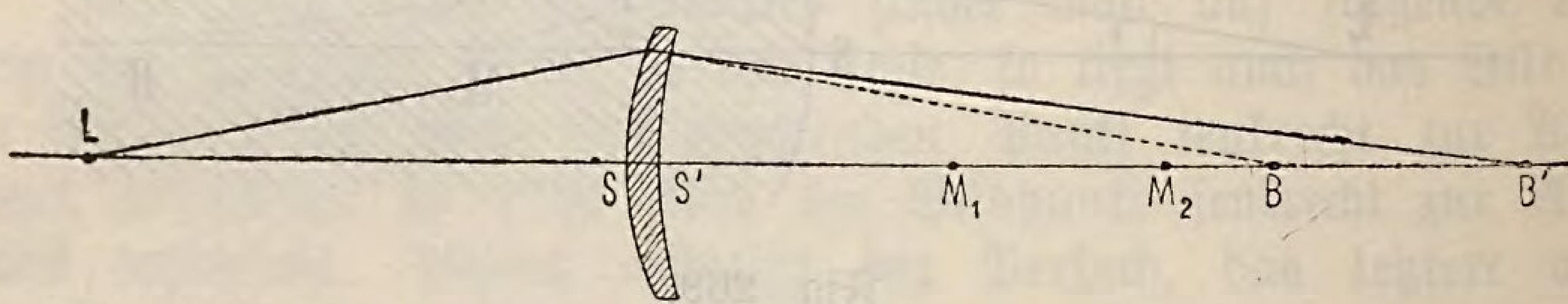


Fig. 270.

von der Fläche bedeutet, hat man zu setzen — b; denn die Lichtstrahlen treffen die zweite Fläche nicht so, als wenn sie von einem vor der Fläche

liegenden Punkte herkämen, sondern so, als wenn sie auf einen hinter der Fläche liegenden Punkt B hin wollten; deshalb muß man dessen Abstand negativ nehmen; dieser Abstand ist b, wenigstens kann er ohne merklichen Fehler = b angenommen werden, wenn die Dicke der Linse verhältnismäßig gering ist.

Macht man diese Einsetzungen in Gleichung A, so wird

$$\text{B)}\ \frac{1}{nb'} = \frac{\frac{1}{n} - 1}{r_2} + \frac{1}{b} \text{ oder B) } \frac{1}{b'} = \frac{1-n}{r_2} + \frac{n}{b}.$$

Eliminiert man b aus A und B durch Addition, so wird:

$$\text{C)}\ (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) = \frac{1}{a} + \frac{1}{b'}.$$

Diese Gleichung C gibt also an: Wenn das Licht an einem Punkte der Achse (Abstand = a) die Linse durchdringt, so schneiden sich die gebrochenen Strahlen alle in einem Punkte B' der Achse, dessen Abstand b' von der Linse aus dieser Gleichung C berechnet werden kann. Dies gilt aber nur, wenn wir Zentralstrahlen betrachten und die Dicke der Linse verhältnismäßig klein ist.

Man findet ferner durch ähnliche Ableitung, daß dieselbe Gleichung C gilt, wenn etwa die sphärische Fläche dem einfallenden Lichte die konkave Seite zuwendet, nur ist dann der Krümmungsradius als negativ einzusetzen, und wenn die Lichtstrahlen sich nach der Brechung nicht in einem Punkte B' hinter sondern vor der Linse schneiden, nur ist dann b' als — einzusetzen.

Die Gleichung C kann noch weiter vereinfacht werden durch Einführung der Brennweite. Fallen nämlich parallele (vom Unendlichen kommende) Lichtstrahlen parallel der Achse auf, so gehen sie nach der Brechung auch durch einen Punkt. Nennt man ihn den Brennpunkt und bezeichnet seinen Abstand von der Linse mit f, so findet man die Größe von f, wenn man in Gleichung C statt $a = \infty$, also $\frac{1}{a} = 0$ und $b' = f$ setzt, also die

Brennpunktsgleichung $(n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) = \frac{1}{f}.$

Setzt man diesen Wert in Gleichung C, so wird sie die

Bildpunktsgleichung $\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}.$

211. Bilder positiver Linsen.

In Bezug auf die Größe der Bilder folgt aus Fig. 268:

$$LL' : BB' = a : b;$$ d. h.

Gegenstand und Bild verhalten sich wie Abstände von der Linse.

Liegt das Bild hinter der Linse, so ist es reell, liegt es vor der Linse, so ist es virtuell.

Liegen Gegenstand und Bild auf verschiedenen Seiten der Linse, so sind sie der Stellung nach verschieden, das Bild ist verkehrt; liegen beide auf derselben Seite der Linse, so haben sie gleiche Stellung, das Bild ist aufrecht.

Zur Untersuchung der Lage der Bilder benützen wir die Bildgleichung $\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}$, woraus $\frac{1}{b} = \frac{1}{f} - \frac{1}{a}$. Wir nehmen an, das Licht komme von links, so liegt der erste Brennpunkt F_1 rechts,

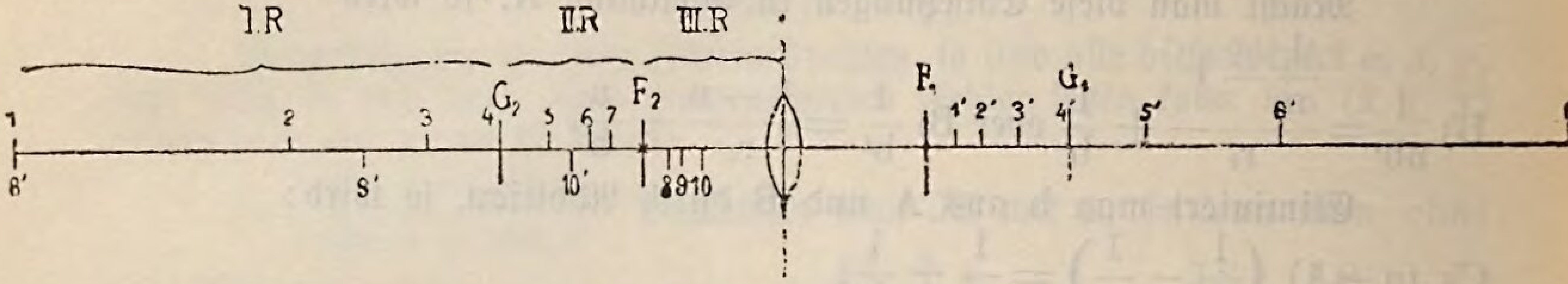


Fig. 271.

der zweite Brennpunkt F_2 links von der Linse. Wir teilen den Raum vom Unendlichen bis zur Linse in drei Räume; der erste Raum reicht vom Unendlichen bis zum Endpunkt der doppelten zweiten Brennweite (G_2), der zweite Raum reicht von da bis zum zweiten Brennpunkt (F_2), der dritte Raum reicht von da bis zur Linse. Ebenso wird der Raum hinter der Linse geteilt: der dritte Raum von der

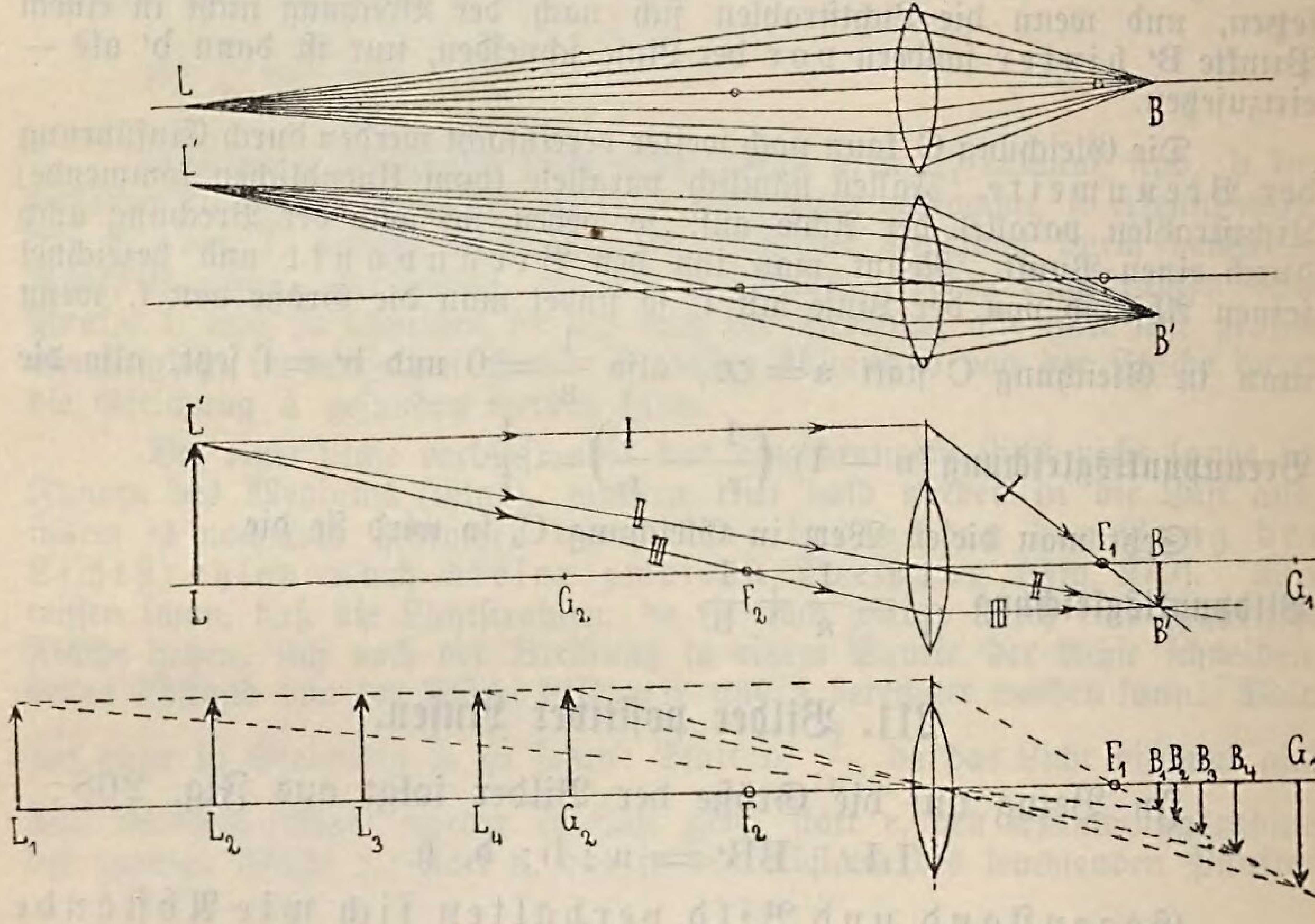


Fig. 272.

Linse bis F_1, der zweite von F_1 bis G_1, der erste von G_1 bis ins Unendliche.

Liegt der leuchtende Punkt im Unendlichen, ist $a = \infty$, so liegt das Bild im ersten Brennpunkt, $b = f$, und ist reell. Das Bild eines endlichen Gegenstandes (Sternes) wäre demnach ein Punkt. Zwei Sterne geben Bilder von meßbarem Abstand. Ihre Bilder liegen dort, wo die Achsen der von ihnen ausgehenden Büschel

paralleler Strahlen die in F_1 zur Achse senkrechte Ebene (Brennpunktsebene) treffen.

Rückt (Fig. 272) der leuchtende Punkt vom Unendlichen gegen G_2, so wird a kleiner, also $\frac{1}{a}$ größer, also wird aus der Bildgleichung $\frac{1}{b}$ kleiner, also b größer; das Bild rückt demnach von F_1 gegen G_1 zu in den zweiten Raum. Ist der l. P. in G_2 angekommen, so ist $a = 2f$, also auch $b = 2f$, deshalb liegt das Bild in G_1. Während also der leuchtende Punkt den ersten Raum vom Unendlichen bis G_2 durchläuft, durchläuft das Bild von F_1 aus den zweiten Raum bis G_1 und ist reell. Das Bild eines Gegenstandes ist dabei verkleinert und verkehrt. Liegt der Gegenstand in G_2, so liegt sein Bild in G_1, ist verkehrt, reell und gleich groß.

In Fig. 272 ist zuerst dargestellt, wie die Lichtstrahlen vom Punkt L ausgehen, durch die Linse (zweimal) gebrochen und dann in einen Punkt B vereinigt werden. Liegt L′ seitwärts der Achse, so liegt auch B′ seitwärts der Achse. In der dritten Figur ist dargestellt, wie man das Bild durch eine Konstruktion finden kann. Man benützt 3 von L′ ausgehende Strahlen: I parallel der Achse, geht dann durch F_1; II geht durch die Mitte der Linse

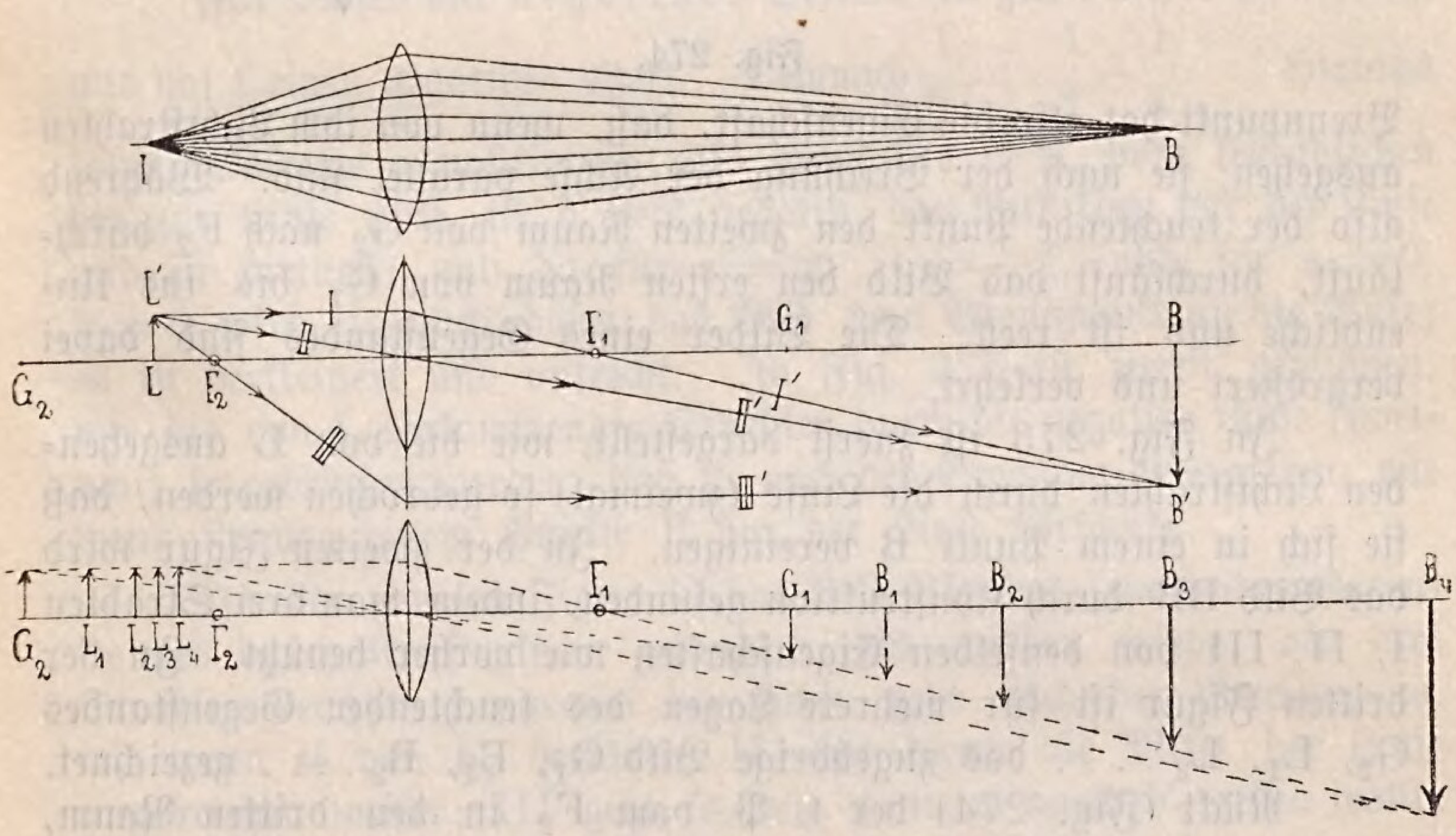


Fig. 273.

ungebrochen weiter; III geht durch F_2 und wird nach der Brechung parallel der Achse. In der vierten Figur sind für mehrere Lagen des leuchtenden Gegenstandes L_1, L_2 . . . G_2 die Bilder B_1, B_2 . . . G_1 gezeichnet.

Rückt (Fig. 273) der l. P. von G_2 in den zweiten Raum, so wird a noch kleiner, $\frac{1}{a}$ größer, also $\frac{1}{b}$ noch kleiner, demnach b noch größer; das Bild rückt von G_1 aus von der Linse weg in den ersten Raum. Ist der l. P. in F_2 angekommen, so ist $a = f$, also $\frac{1}{b} = 0$, also $b = \infty$: das Bild liegt im Unendlichen, die Lichtstrahlen sind nach der Brechung parallel der Achse. Der zweite

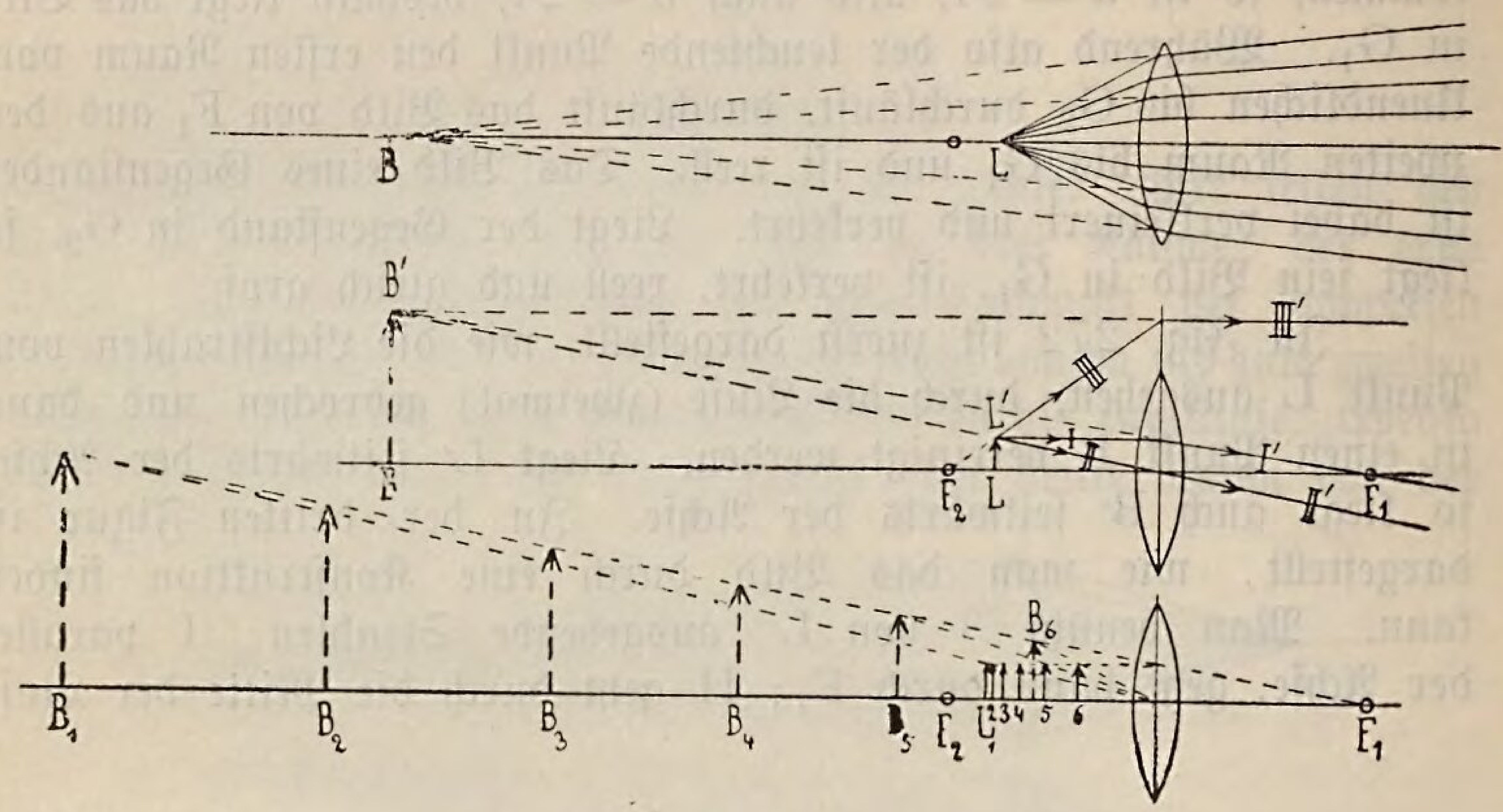


Fig. 274.

Brennpunkt hat also die Eigenschaft, daß, wenn von ihm Lichtstrahlen ausgehen, sie nach der Brechung der Achse parallel sind. Während also der leuchtende Punkt den zweiten Raum von G_2 nach F_2 durchläuft, durchläuft das Bild den ersten Raum von G_1 bis ins Unendliche und ist reell. Die Bilder eines Gegenstandes sind dabei vergrößert und verkehrt.

In Fig. 273 ist zuerst dargestellt, wie die von L ausgehenden Lichtstrahlen durch die Linse (zweimal) so gebrochen werden, daß sie sich in einem Punkt B vereinigen. In der zweiten Figur wird das Bild BB' durch Konstruktion gefunden, indem man drei Strahlen I, II, III von denselben Eigenschaften wie vorher benützt. In der dritten Figur ist für mehrere Lagen des leuchtenden Gegenstandes G_2, L_1, L_2 .... das zugehörige Bild G_1, B_1, B_2 .... gezeichnet.

Rückt (Fig. 274) der l. P. vom F_2 in den dritten Raum, so wird $a < f$, also $\frac{1}{a} > \frac{1}{f}$; deshalb ergibt sich $\frac{1}{b}$ negativ. Das bedeutet, daß das Bild nicht hinter, sondern vor der Linse liegt. So lange dabei a noch nahezu $= f$ ist, ist auch b noch sehr groß; wird a kleiner und schließlich $= 0$, so wird auch b kleiner und schließlich $= 0$. Während also der leuchtende Punkt von F_2 aus

den dritten Raum durchläuft bis zur Linse, durchläuft das Bild den ganzen Raum vor der Linse vom Unendlichen bis zur Linse und ist virtuell. Die Bilder eines Gegenstandes sind dabei vergrößert und aufrecht.

In Fig. 274 ist zuerst gezeichnet, wie die von L herkommenden Strahlen durch die positive Linse (zweimal) so gebrochen werden, daß sie nach der Brechung divergieren, wie wenn sie von dem vor der Linse liegenden Punkte B herkämen. In der zweiten Figur ist das Bild BB′ des leuchtenden Gegenstandes LL′ durch Konstruktion gefunden. Hiezu werden wieder die drei Strahlen benützt: I parallel der Achse geht dann durch F_1, II geht durch die Mitte der Linse ungebrochen weiter, III, welches so geht, als wenn es von F_2 herkäme, wird nach der Brechung parallel der Achse; die drei gebrochenen Strahlen I′, II′, III′ divergieren so, wie wenn sie von B′ herkämen. In der dritten Figur ist für verschiedene Lagen des leuchtenden Gegenstandes L_1, L_2 rc. das virtuelle Bild B_1, B_2 rc. gezeichnet.

Mit einer Kerzenflamme und einer positiven Linse kann man leicht die reellen Bilder erzeugen, auf einem Schirme auffangen und ihre Lage, Art und Größe ersehen.

212. Bilder negativer Linsen.

Für Linsen mit negativer Brennweite gilt dieselbe Gleichung, nur hat f einen negativen Wert. Demnach $\frac{1}{b} = \frac{1}{f} - \frac{1}{a}$. Hieraus folgt: Solange a positiv ist, also wenn der l. P. vom Unendlichen bis zur Linse rückt, ist b stets negativ, das Bild liegt vor der Linse und ist virtuell; und da für $a = \infty$, $b = -f$, und für $a = 0$, $b = 0$ wird, so rückt dabei das Bild vom Brennpunkt an die Linse; es ist verkleinert und aufrecht. In Fig. 275 ist zuerst gezeichnet, wie die von L herkommenden Strahlen durch die negative Linse (zweimal) so gebrochen werden, daß sie nach der Brechung divergieren, wie wenn sie von einem Punkte B vor der Linse herkämen.

In der zweiten Figur ist das Bild BB′ des leuchtenden Gegenstandes durch Konstruktion gefunden. Es werden wieder die drei Strahlen benützt: I parallel der Achse, geht nach der Brechung so, wie wenn es von F_1 herkäme; II geht durch die Mitte der Linse ungebrochen weiter; III geht so, wie wenn es durch F_2 gehen wollte und wird so gebrochen, daß es parallel der Achse wird.

In der dritten Figur ist dargestellt, wie Lichtstrahlen, welche konvergent auf die Linse treffen, so wie wenn sie auf einen hinter der Linse zwischen Linse und F_2 liegenden Punkt L hingehen wollten, so gebrochen werden, daß sie sich in einem Punkte B treffen. In diesem Fall ist a negativ und kleiner als f, z. B. $f = -27$, $a = -21{,}7$;

die Bildgleichung $\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}$ gibt dann $-\frac{1}{27} = -\frac{1}{21{,}7} + \frac{1}{b'}$ hieraus $b = 110$.

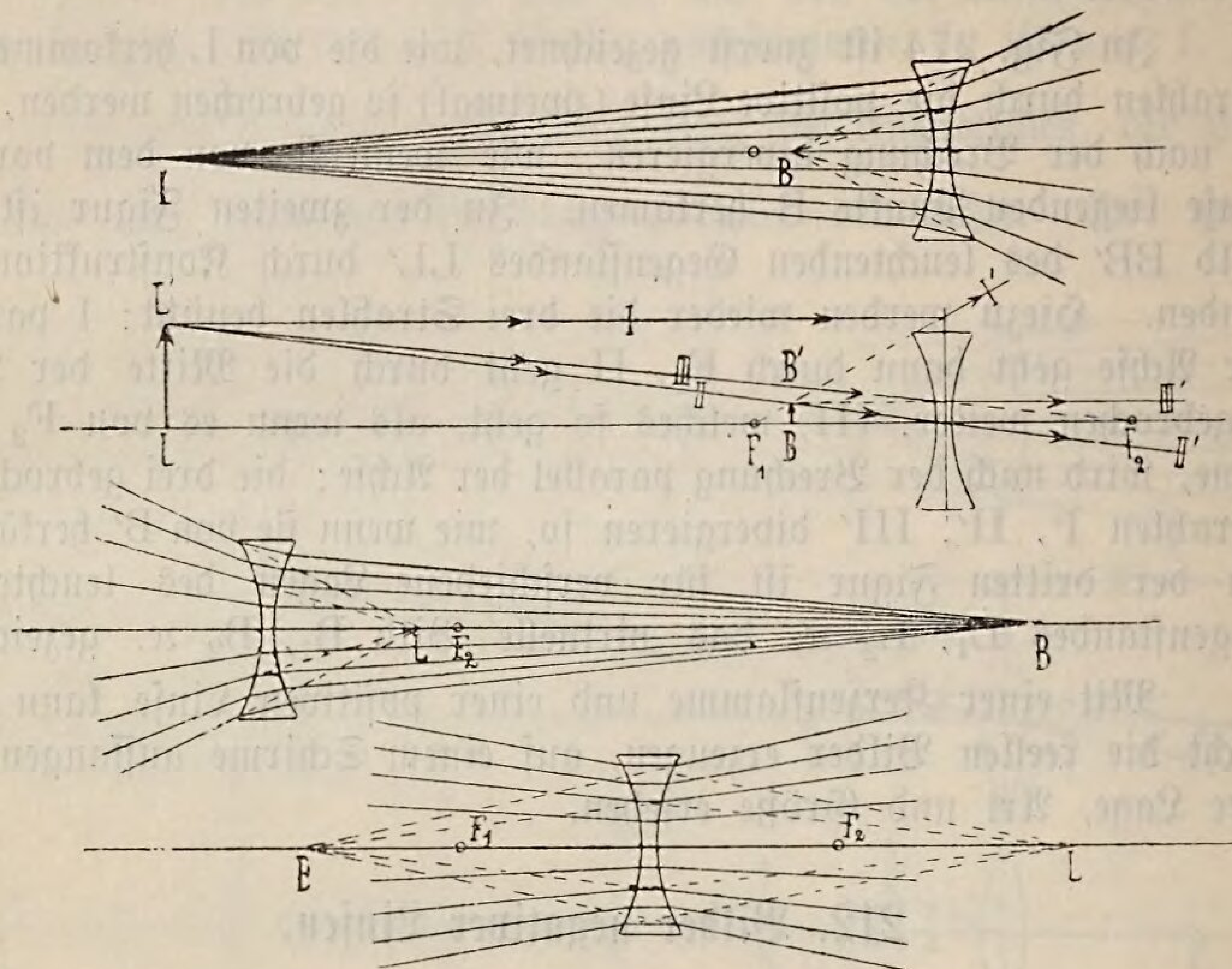


Fig. 275.

In der vierten Figur ist dargestellt, wie Lichtstrahlen, welche auf einen hinter der Linse hinter F_2 liegenden Punkt L konvergieren, so gebrochen werden, daß sie divergieren, wie wenn sie von einem vor der Linie liegendem Punkte B herkämen. In diesem Falle ist a negativ und größer als f, z. B. $f = -27$; $a = -60$; die Bildgleichung $\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}$ gibt $-\frac{1}{27} = -\frac{1}{60} + \frac{1}{b}$; hieraus $b = -49$.

Barrow († 1677) gab eine geometrische Methode an, um bei jeder Linse die Lage des Bildes zu finden für jede Lage des l. P. Cavalieri stellte 1647 die erste Brennpunktsgleichung für Glaslinsen auf. Nimmt man nämlich $n = \frac{3}{2}$, so wird unsere Gleichung $\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r_1}\right)$

$$\text{oder } f = \frac{rr_1}{(n-1)(r+r_1)}, \text{ also } f = \frac{2rr_1}{r+r_1}, \text{ oder}$$

$(r+r_1) : r = 2r_1 : f$; das in Cavalieris Regel.

213. Das Auge als optischer Apparat.

Der Augapfel ist eingehüllt von der harten Haut, welche undurchsichtig, außen weiß, innen geschwärzt und lederartig hart ist. Vorn ist ein Teil derselben ersetzt durch die Hornhaut, die auch

lederartig zähe, aber durchsichtig und etwas stärker gewölbt ist. Das Innere des Auges ist durch die Regenbogenhaut in zwei Teile geschieden; die vordere, kleinere Augenkammer, welche angefüllt ist mit einer klaren, wässerigen Flüssigkeit, und die hintere größere Augenkammer, welche mit einer gallertartigen Masse

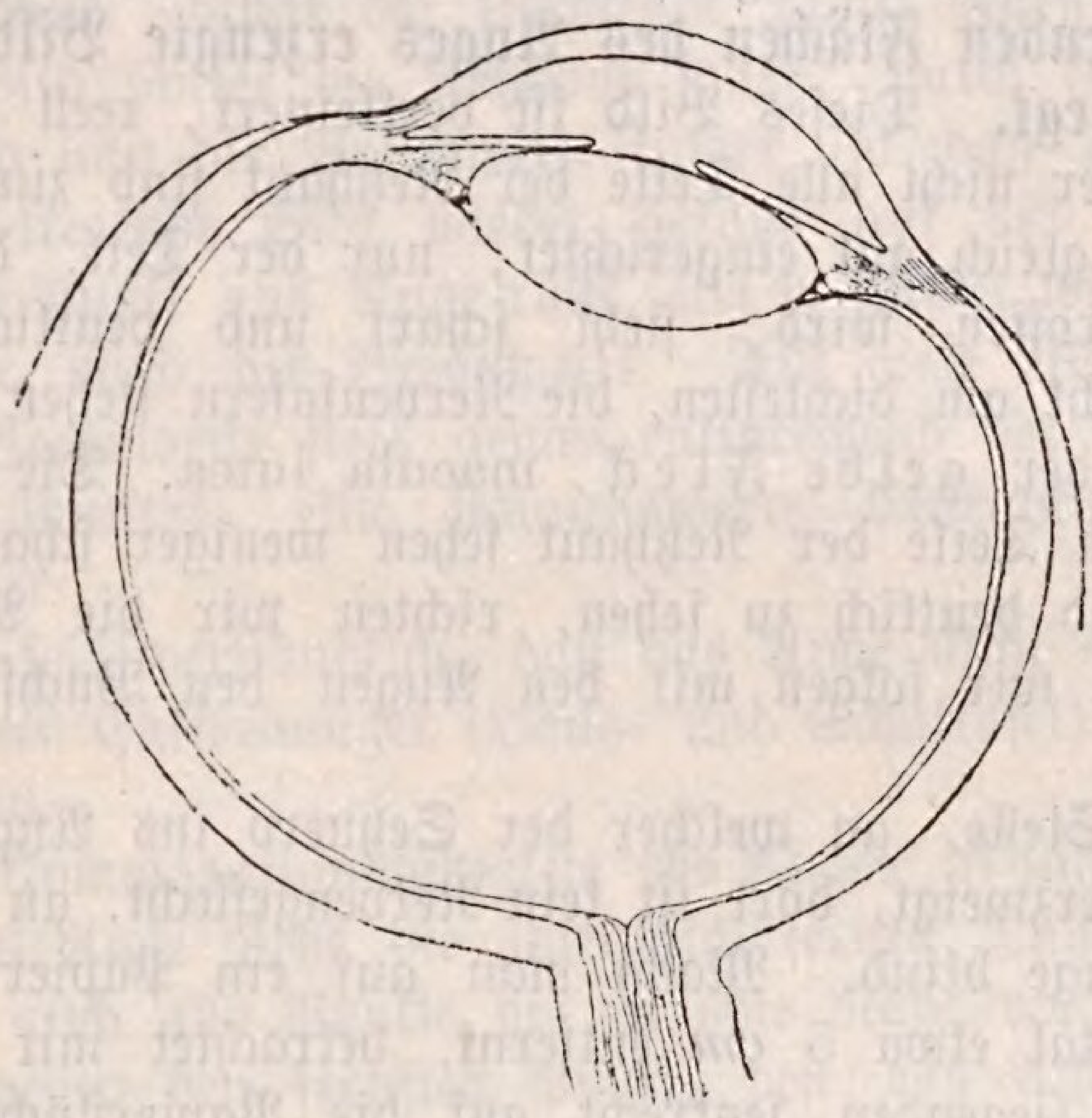


Fig. 276.

gefüllt ist, die ganz klar ist, das Licht stark bricht und Glaskörper heißt. In der hinteren Augenkammer sitzt auch noch gleich hinter der Regenbogenhaut die Krystallinse, eine klare, das Licht stark brechende, positive Linse von kurzer Brennweite, bestehend aus einer knorpelähnlichen, aber ganz durchsichtigen Masse. Die Regenbogenhaut, Iris, ist undurchsichtig, vorn braun oder blau oder grau, und hat in der Mitte eine Öffnung, das Sehloch oder die Pupille; nur durch dieses Loch dringt Licht ins Auge; sieht man ins Dunkle, so erweitert sich die Pupille, um viel Licht eindringen zu lassen; sieht man ins Helle, so verengt sie sich, spielt also die Rolle einer Blende. Die hintere Wand der Augenkammer ist mit der Netzhaut (retina) ausgekleidet, in welcher sich der Sehnerv verbreitet; dieser kommt vom Gehirne, dringt seitwärts ins Auge ein, zerteilt sich in seine einzelnen, sehr zahlreichen Fasern, und diese endigen in sehr dünnen Stäbchen, die dicht neben einander stehend dem einfallenden Licht ihre Enden zukehren. Werden diese Nervenenden vom Lichte getroffen, so empfinden wir das Licht, wir sehen.

Ist das Auge auf einen fern liegenden leuchtenden Punkt gerichtet, so werden die Lichtstrahlen durch Hornhaut und Krystallinse gebrochen und in einem Punkt hinter der Linse vereinigt. Liegt nun der Bildpunkt genau auf der Netzhaut, so sehen wir den Punkt klar und deutlich, liegt aber das Bild vor oder hinter der Netzhaut, so

wird nicht bloß ein Punkt, sondern eine ganze Fläche (Zerstreuungskreis) der Netzhaut von den Lichtstrahlen getroffen; das Auge empfindet noch Licht und Farbe, aber nicht mehr deutlich, sondern verwaschen, verschwommen.

Wir sehen einen Gegenstand nur dann deutlich, wenn das durch die brechenden Flächen des Auges erzeugte Bild genau auf der Netzhaut liegt. Dieses Bild ist verkleinert, reell und verkehrt (Scheiner). Aber nicht alle Teile der Netzhaut sind zum deutlichen, scharfen Sehen gleich gut eingerichtet; nur der Teil, der von der Augenachse getroffen wird, sieht scharf und deutlich, dort ist das Nervengeflecht am dichtesten, die Nervenfasern stehen am engsten; der Teil heißt der gelbe Fleck, macula lutea. Die etwas weiter davon entfernten Teile der Netzhaut sehen weniger scharf; um also einen Gegenstand deutlich zu sehen, richten wir die Augenachse auf ihn, z. B. wir folgen mit den Augen den Buchstaben, wenn wir lesen.

An der Stelle, an welcher der Sehnerv ins Auge tritt, ist er noch nicht verzweigt, dort ist kein Nervengeflecht, an dieser Stelle ist also das Auge blind. Macht man auf ein Papier zwei (dicke) Punkte, horizontal etwa 5 *cm* entfernt, betrachtet mit dem rechten Auge den links liegenden, senkrecht auf die Papierfläche sehend, so findet man, wenn man näher hin oder weiter weg geht, daß man den rechts liegenden Punkt nicht mehr sieht, sein Bild liegt dann an dieser Eintrittsstelle des Sehnerves. (Mariotte.)

214. Akkommodation.

Die verschiedenen brechenden Medien des Auges, Hornhaut, wässerige Flüssigkeit, Krystallinse, Glaskörper, wirken wie eine einzige Linse (oder wie eine einzige brechende Fläche). Da dieselbe von Gegenständen, die sich in verschiedenen Entfernungen vom Auge befinden, auch Bilder erzeugt, die in verschiedenen Entfernungen hinter der Linse liegen, und wir den Gegenstand nur dann deutlich sehen, wenn das Bild genau auf der Netzhaut liegt, so folgt, daß wir nicht Gegenstände, die in verschiedenen Entfernungen liegen, zugleich deutlich sehen können, ja daß, wenn das Auge sonst keine Vorrichtung hätte, wir nur Gegenstände in ganz bestimmter Entfernung deutlich sehen könnten.

Das Auge hat aber innerhalb gewisser Grenzen die Fähigkeit, sich so einzurichten, daß es Gegenstände in verschiedenen Entfernungen nach einander deutlich sehen kann, das Auge kann akkommodieren (sich anbequemen, anpassen). Diese Akkommodationsfähigkeit beruht auf folgendem: Die Krystallinse ist befestigt an einem sie rings umgebenden Band, und dessen Spannung kann durch den im Auge befindlichen, ringsum am Rand der Hornhaut ent=

springenden Muskel, den Ciliarmuskel, verringert werden. Dann wölben sich die Flächen der Linse, namentlich die vordere stärker, und die Brennweite wird kürzer. Befindet sich nun der betrachtete Punkt im Unendlichen, so bleibt der Muskel ganz schlaff, die Linse ist möglichst flach, ihre Brennweite möglichst groß, sie reicht gerade bis zur Netzhaut. Rückt der leuchtende Punkt gegen das Auge, so würde das Bild hinter die Netzhaut fallen; durch Anspannung des Muskels wird nun die Brennweite kürzer, so daß das hinter dem Brennpunkte liegende Bild wieder gerade auf der Netzhaut liegt. Je näher der Punkt ans Auge rückt, um so stärker wirkt der Muskel, um so kürzer wird die Brennweite. Auf diese Weise richtet das Auge seine Brennweite stets genau entsprechend der Entfernung des betrachteten Punktes, eine staunenswerte Einrichtung. (Thomas Young 1800.)

Es ist selbstverständlich, daß das Auge nicht auf zwei Punkte in verschiedenen Entfernungen (Hand- und Schultafel) zugleich akkommodieren kann.

Die Akkommodationsfähigkeit des Auges ist nicht unbeschränkt. Ein normales Auge sieht die unendlich fernen Punkte (die Sterne) deutlich und auch alle Punkte bis in eine Nähe von ca. 20 *cm*.

Man nennt den fernsten Punkt, den das Auge noch deutlich sehen kann, den Fernpunkt, und den nächsten den Nahpunkt, die Strecke zwischen beiden die Akkommodationsbreite.

215. Fehler in der Akkommodation. Brillen.

Das kurzsichige Auge. Durch angestrengtes, lange dauerndes Sehen in große Nähe, besonders in der Jugend, wird das Auge kurzsichtig, d. h. es verliert die Fähigkeit, ferne Gegenstände deutlich zu sehen; der Fernpunkt liegt nicht mehr im Unendlichen, sondern sehr nahe 2 *m*, 1 *m*, 50 *cm* am Auge. Dies kommt daher, daß infolge des angestrengten und andauernden Sehens in die Nähe, insbesondere noch bei vorgebeugtem Kopfe (schlechter Haltung beim Lesen und Schreiben und schlechter Beleuchtung) im Auge Blutandrang, starker Blutdruck entsteht, der die besonders in der Jugend noch weichen Teile der hinteren Netzhaut (am gelben Flecke) nach auswärts drückt, so daß die Entfernung der Netzhaut von der Linse größer, die Augenachse länger wird. Deshalb können die Bilder fern liegender Gegenstände nicht mehr auf der Netzhaut liegen. Einen (kleinen) Vorteil hat das kurzsichtige Auge dadurch, daß es auch noch Gegenstände näher als 20 *cm* sehen kann, der Nahepunkt rückt näher ans Auge (bis 5 *cm*). Die Akkommodationsbreite eines kurzsichtigen Auges reicht also etwa von 1 *m* bis 5 *cm*.

Man hilft dem kurzsichtigen Auge durch eine Brille mit negativen Linsen und wählt deren Brennweite gleich dem Ab-

stand des Fernpunktes vom Auge; denn dann entwirft diese Brille von den Punkten, die zwischen dem Unendlichen und dem Fernpunkte (Brennpunkte) liegen, Bilder, die zwischen dem Brennpunkte (Fernpunkte) und dem Auge liegen; das Auge kann also auf diese Bilder akkommodieren, sie also deutlich sehen. Auch von den Punkten, die innerhalb des Brennpunktes liegen, entwirft die Brille Bilder, die noch jenseits des Nahepunktes liegen, also auch noch gesehen werden können. Da aber das Auge solche innerhalb des Fernpunktes liegende Punkte auch ohne Brille sehen kann, mit der Brille aber sich mehr anstrengen muß, da die Bilder sehr nahe liegen, so wird empfohlen, bei Betrachtung naher Gegenstände, also beim Lesen und Schreiben (wenn die Kurzsichtigkeit noch nicht hochgradig ist) die Brille zu entfernen und sie nur für ferne Gegenstände zu benützen; auch soll man sich die Brille von einem augenkundigen Arzte aussuchen lassen.

Das weitsichtige Auge. Bei vorgerücktem Alter von 40 bis 50 Jahren wird manchmal die Krystallinse etwas härter, so daß sie sich bei Betrachtung naheliegender Punkte nicht mehr stark genug wölben kann, wohl auch wird die Wölbung der Hornhaut etwas flacher; dadurch wird das Auge weitsichtig, d. h. es verliert die Fähigkeit, auf naheliegende Punkte zu akkommodieren; der Nahepunkt rückt weiter weg, bis 40, bis 60, bis 100 *cm*. Fernliegende Gegenstände sieht das Auge noch ganz gut, oft ausgezeichnet; denn der Fernpunkt liegt im Unendlichen.

Zur Betrachtung naheliegender Gegenstände (zum Lesen und Schreiben) bedient sich der Fernsichtige einer Brille mit positiven Linsen, hält sie so, daß der Gegenstand im dritten Raume der Linse liegt, also zwischen zweitem Brennpunkt und Linse; dann entwirft die Linse ein vergrößertes, virtuelles, aufrechtes Bild vor der Linse, das aber in größerer Entfernung liegt; wird nun die Brennweite der Linse so gewählt, daß das Bild jenseits des Nahepunktes liegt, so kann das Auge darauf akkommodieren. Bei Betrachtung fern liegender Punkte muß die Brille stets entfernt werden.

216. Das scharfe Sehen.

Will man einen Gegenstand möglichst gut sehen, d. h. die einzelnen Teile, die Punkte und Linien desselben möglichst gut von einander unterscheiden können, so muß der Gegenstand jedenfalls in der Akkommodationsbreite liegen; aber es ist dabei nicht gleichgültig, wo er liegt. Sind z. B. zwei Punkte recht nahe beisammen, z. B. 1 *mm*, und vom Auge recht weit entfernt, z. B. eine Meile, so liegen die Bilder dieser Punkte wohl beide ganz klar auf der Netzhaut, aber so nahe beisammen, daß sie etwa auf ein und dasselbe oder auf sehr benachbarte Nervenenden treffen; man hat also auch nur

eine Empfindung, man sieht die Punkte nicht getrennt. Sie müssen näher am Auge liegen, damit ihre Bilder auf verschiedenen oder ziemlich weit entfernten Nervenenden der Netzhaut liegen, damit man sie also als getrennte Punkte wahrnehmen kann. Man sieht daher um so mehr Einzelheiten (Details) an dem betrachteten Gegenstand, je näher er dem Auge ist, also unter je größerem Gesichtswinkel man ihn sieht. Man nimmt an, daß für ein gutes Auge eine Schrift von 1 *mm* Höhe der kleinen Buchstaben in 1 *m* Entfernung noch lesbar ist, also bei 2 *mm* Höhe in 2 *m* Entfernung u. s. w.

217. Die Lupe oder das einfache Mikroskop.

Wollen wir einen Gegenstand möglichst gut sehen, so müssen wir ihn möglichst nahe ans Auge halten um den Sehwinkel groß zu machen; aber wir können ihn nicht näher als bis an den Nahepunkt bringen, sonst kann das Auge nicht mehr akkommodieren, und der Gegenstand erscheint undeutlich. Um nun den Gegenstand gleichwohl näher ans Auge bringen zu können, bedient man sich der Lupe oder des Vergrößerungsglases. Das ist eine positive Linse von sehr kurzer Brennweite (etwa 1 *cm*).

Man hält den Gegenstand zwischen den zweiten Brennpunkt und die Linse (Fig. 277); dann entwirft die Linse ein Bild, welches vergrößert, virtuell, aufrecht, vor der Linse und weiter entfernt ist. Hält man nun das Auge hinter die Lupe und liegt das Bild in der Akkommodationsbreite des Auges, so kann man dieses Bild deutlich sehen.

Das Auge sieht das Bild größer, als es den Gegenstand ohne Lupe sehen würde. Denn würde man den Gegenstand ohne Lupe betrachten, so müßte man ihn mindestens in den Nahepunkt halten, nach L_1 L'_1, also 20 *cm* vom Auge; er erscheint dann unter einem kleinen Gesichtswinkel, etwa 1^0. Betrachtet man ihn aber mit der Lupe, so ist er, wenn deren Brennweite etwa 3 *cm* beträgt, 3 *cm* (oder etwas weniger) von der Lupe entfernt in L L', also auch, wenn das Auge sich unmittelbar hinter der Lupe befindet, 3 *cm* (ca.) vom Auge entfernt, ist also sechsmal näher am Auge, erscheint demnach unter (nahezu) sechsmal größerem Gesichtswinkel β, etwa 6^0, also sechsmal vergrößert.

Dabei ist nach folgendes zu beachten:

1. Will man mittels der Lupe den Gegenstand möglichst stark vergrößert sehen, so muß man das Auge möglichst nahe an die Lupe halten; denn das von der Linse entworfene Bild BB' sieht man vom Punkte A aus offenbar unter größerem Gesichtswinkel als von einem weiter entfernten Punkte.

2. Hält man das Auge ganz nahe an die Lupe, deren Dicke an sich sehr gering ist, so verändert die Lupe den Gesichts-

winkel nicht (nur unmerklich). Denn allerdings entwirft die Lupe ein vergrößertes Bild; aber so vielmal dasselbe größer ist, ebensovielmal ist es weiter entfernt; ein in A befindliches Auge sieht also den Gegenstand LL′ ohne Lupe unter demselben Gesichtswinkel β, unter welchem es das Bild BB′ sieht. Es wird also durch die Lupe der Gesichtswinkel β des in der Entfernung LA vor dem Auge befindlichen Gegenstandes nicht verändert, wohl aber wird durch sie die Akkommodation ermöglicht; denn während L so

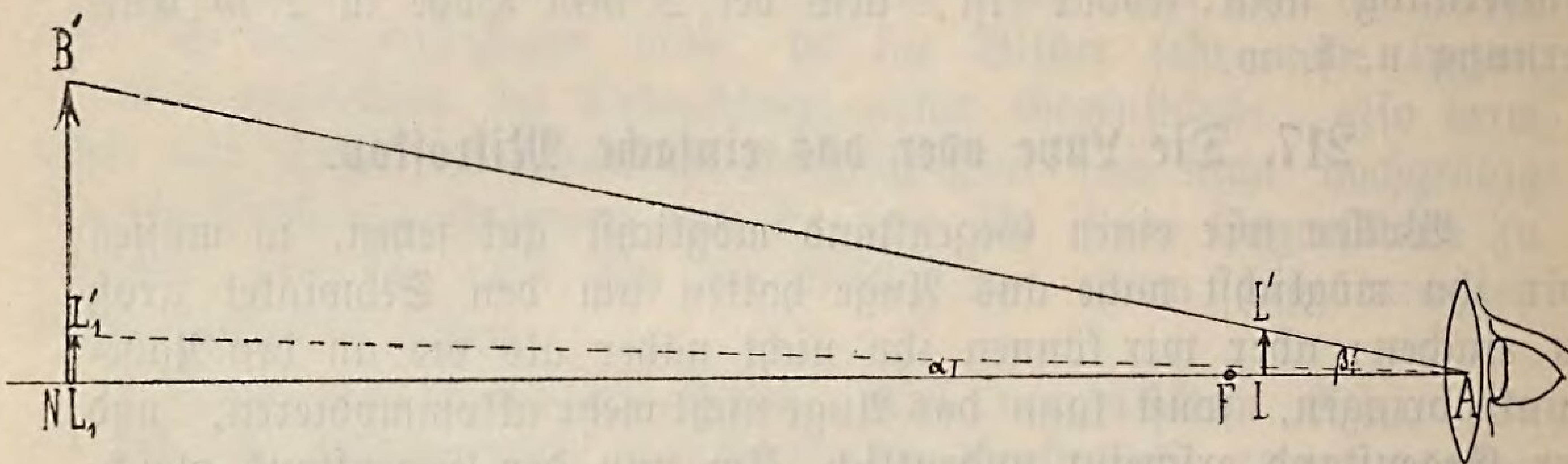


Fig. 277.

nahe am Auge liegt, daß das Auge darauf nicht mehr akkommodieren kann, kann es auf das in größerer Entfernung liegende Bild BB′ akkommodieren. Die Lupe ermöglicht demnach das deutliche Sehen sehr nahe liegender Gegenstände, indem sie von denselben weiter entfernte, in der Akkommodationsbreite liegende Bilder entwirft, ohne den Winkel (wesentlich) zu verändern.

3. Um möglichst starke Vergrößerung zu erzielen, muß man den Gegenstand so halten, daß das Bild gerade im Nahepunkt liegt; denn je näher man den Gegenstand an die Lupe hält, unter um so größerem Gesichtswinkel erscheint er, (vergleiche Fig. 274, 3); um aber noch auf ihn akkommodieren zu können, muß das Bild noch in der Akkommodationsbreite liegen, darf also höchstens in den Nahepunkt rücken. Liegt etwa in Fig. 274, 3 der Nahepunkt in B_4, so sieht man den Gegenstand in L_4 größer als in L_3 oder L_1, obwohl B_4 kleiner ist als B_3 oder B_1; den Gegenstand noch näher an die Linse zu halten, nach L_5, ist unzulässig, weil dann das Bild B_5 nicht mehr in der Akkommodationsbreite liegt.

4. Die Vergrößerung einer Lupe ist um so beträchtlicher, je kleiner ihre Brennweite ist; **der Gegenstand erscheint (nahezu) so vielmal größer, als die Brennweite in der Entfernung des Nahepunktes enthalten ist.** Dann nehmen wir wieder an, der Gegenstand erscheine im Nahepunkt (20 *cm*) ohne Lupe unter dem Winkel 1′, und nehmen wir eine Lupe von etwa 1 *cm* (2 *mm*) Brennweite, so wird der Gegenstand 1 *cm* (2 *mm*)

und um ein kleines näher an die Linse gehalten; er erscheint daher unter einem zwanzigmal (hundertmal) größeren Sehwinkel.

Besonders Leeuwenhoek † 1723 verstand es, einfache Mikroskope von bedeutender Kraft herzustellen und erzielte dabei bis 160fache Vergrößerung. Er machte beiderseits sehr stark gekrümmte, stecknadelkopfgroße Linsen. Man verwendet gegenwärtig nur Lupen von mäßiger Vergrößerung (Uhrmacher, Xylograph u. s. w.). Sind stärkere Vergrößerungen erwünscht, so bedient man sich des Mikroskopes. Lupen von starker Vergrößerung also kurzer Brennweite sind stets sehr klein. Statt ihrer nimmt man zwei positive Linsen von etwas größerer Brennweite, welche also ziemlich groß sein können, und befestigt sie in kurzem Abstande hinter einander in einer Hülse; sie wirken dann wie eine Lupe von kurzer Brennweite (zusammengesetzte Lupe).

Optische Projektionsapparate.

218. Die Camera obscura, Dunkelkammer.

Die Dunkelkammer ist ein innen geschwärzter Holzkasten. In die vordere Seitenwand ist eine positive Linse von mäßiger Brennweite, das Objektiv, eingelassen, so daß sie in einer Hülse etwas nach auswärts oder einwärts geschoben werden kann. Die gegenüberliegende Wand besteht aus einer mattgeschliffenen Glastafel.

Von ferne liegenden Gegenständen, die sich im ersten Raume vor der Linse befinden, entwirft die Linse ein reelles, verkehrtes, verkleinertes Bild hinter der Linse im zweiten Raume, das bei passender Stellung der Linse und Glastafel genau auf der Glastafel liegt und so auf ihr gesehen werden kann. Sind mehrere Gegenstände in verschiedenen Entfernungen vom Objektiv vorhanden, so liegen auch ihre Bilder in verschiedenen Entfernungen hinter der Linse, können also nicht zugleich deutlich auf der Glastafel aufgefangen werden; man stellt so ein, daß das wichtigste Bild scharf erscheint; die andern sind dann verschwommen.

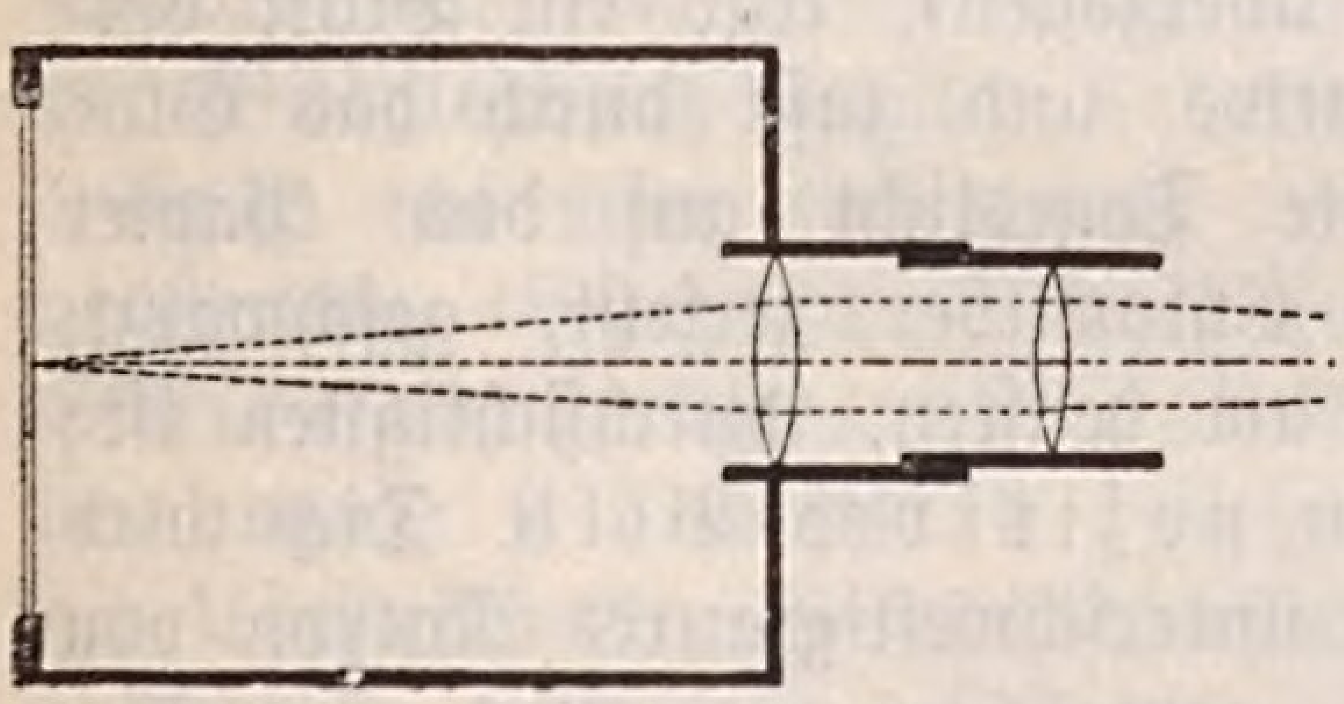


Fig. 278.

Legt man auf die Glastafel ein mit Öl getränktes, also durchscheinendes Papier, so können die Umrisse des Gegenstandes auf demselben leicht nachgezeichnet werden.

Die meiste Anwendung findet diese camera obscura beim Photographieren. Nachdem nämlich der Photograph diese Dunkelkammer (den photographischen Apparat) so gerichtet hat, daß das Bild genau auf der Glastafel erscheint, wird die Glastafel entfernt und genau an ihre Stelle eine andere Glastafel gestellt, die mit einer lichtempfindlichen Schichte versehen ist. Es wird nämlich eine Glastafel mit einer Auflösung von Kollodium und

Jodkalium in Äther übergossen; der Äther verdunstet und es bleibt eine Schichte, ein dünnes Häutchen von Kollodium, das etwas Jodkalium enthält, zurück. Die Platte wird nun in eine Lösung von Silbernitrat getaucht, wobei durch Wechselzersetzung auf ihr eine dünne Schichte Jodsilber entsteht (Kaliumnitrat geht in Lösung). Diese Glastafel wird nun in der Dunkelkammer dem Lichte ausgesetzt, exponiert. An den vom Lichte getroffenen Stellen wird das Jodsilber zersetzt, um so mehr, je stärker das Licht einwirkt. Die Platte wird nun aus der Dunkelkammer genommen, zeigt aber noch kein Bild; sie wird nun mit Eisensulfatlösung übergossen; dadurch wird an den Stellen, auf welche das Licht gewirkt hat, das Jodsilber zu metallischem (undurchsichtigem) und wegen seiner feinen, staubförmigen Verteilung dunkel erscheinenden Silber reduziert um so mehr, je stärker das Licht eingewirkt hat. Das unzersetzt zurückgebliebene Jodsilber wird durch Eintauchen in unterschwefligsaures Natron aufgelöst und entfernt. Man hat nun ein negatives Bild, an welchem die hellen Stellen des Gegenstandes dunkel erscheinen wegen des metallischen Silbers, und die dunklen Stellen durchsichtig sind. Die Platte wird gewaschen, getrocknet retouchiert und gefirnißt. Von diesem Negativ werden nun die photographischen Bilder gemacht (abgezogen, kopiert). Man nimmt ein eigens präpariertes Papier (photographisches Papier, mit Albumin, Eiweiß getränkt und mit einer Schichte Chlorsilber überzogen), legt ein Blatt desselben auf die Bildfläche des Negativs und läßt durch das Glas der negativen Platte das zerstreute Tageslicht auf das Papier wirken, so wird durch dasselbe das Chlorsilber zersetzt, geschwärzt, dort am stärksten, wo das Negativ am hellsten, durchsichtigsten ist; es entsteht also auf dem Papier ein positives Bild. Dies wird fixirt, d. h. durch Eintauchen in unterschwefligsaures Natron von dem unzersetzten Chlorsilber befreit, gewaschen, vergoldet (um ihm eine schönere Farbe zu geben), gewaschen, getrocknet, aufgeklebt, retouchiert und satiniert. Vom Negativ kann man beliebig viele Bilder (Abzüge) machen.

219. Die Laterna magica. Zauberlaterne.

Die Zauberlaterne besteht aus einem Beleuchtungs- und dem Projektionsapparate. Der Beleuchtungsapparat besteht nur aus einer stark leuchtenden Flamme (Petroleumlicht), in einem innen geschwärzten Kasten befindlich. An einer Seite des

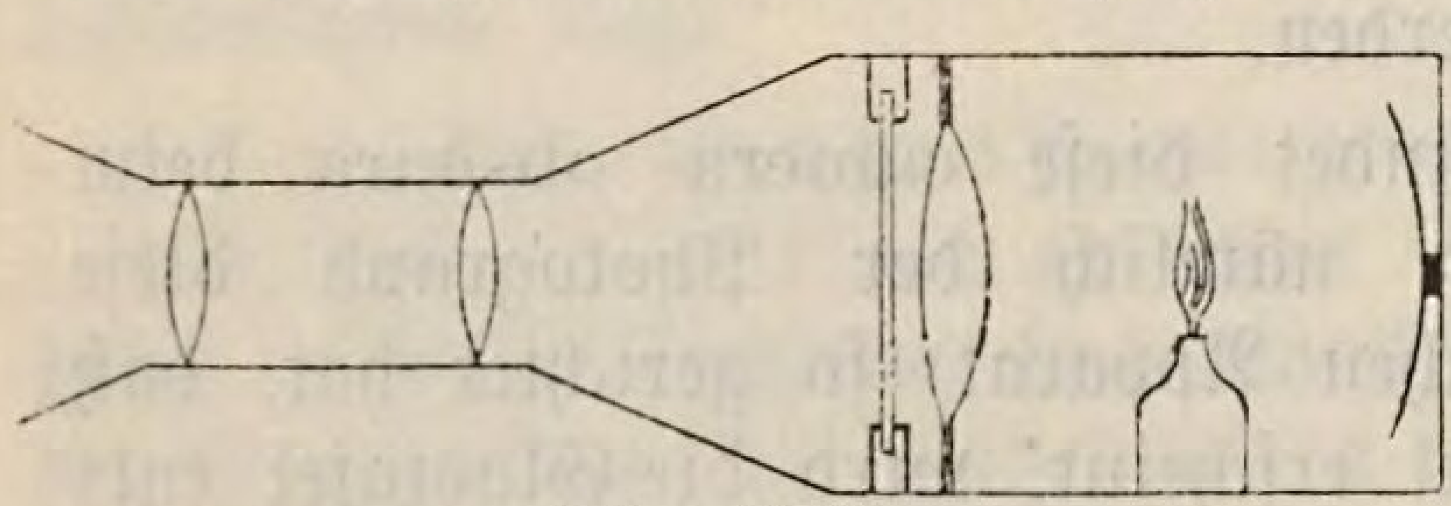


Fig. 279.

Kastens ist eine Öffnung angebracht, und an der gegenüberliegenden Seite ist als Reflektor ein Hohlspiegel angebracht, der das auf ihn

fallende Licht auch zu der Öffnung schickt. Dort wird es durch eine große Sammellinse parallel gemacht, und trifft dann auf ein auf Glas gemaltes, gezeichnetes oder photographiertes Bild, das durchsichtig, an den farbigen Stellen mindestens durchscheinend ist; durch die auffallenden Lichtstrahlen wird es selbst leuchtend.

Vor diesem leuchtenden Gegenstand wird nun die Projektionslinse, eine positive Linse von mäßiger Brennweite, so aufgestellt, daß der Gegenstand im zweiten Raume und zwar gewöhnlich dem zweiten Brennpunkte ziemlich nahe liegt. Dann entwirft die Linse von dem Gegenstande ein reelles, verkehrtes vergrößertes und weiter entferntes Bild. Da das Bild reell ist, kann es auf einem Schirme aufgefangen und, wenn es sonst im Zimmer dunkel ist, von vielen Personen zugleich gesehen werden; um das Bild aufrecht erscheinen zu lassen, stellt man die Zeichnung verkehrt ein.

Das Bild ist vergrößert, denn es ist weiter von der Linse entfernt. Man könnte eigentlich die Vergrößerung beliebig weit treiben; um aber deutliche, scharf begrenzte Bilder zu erhalten, muß man innerhalb gewisser Entfernungen bleiben. Ist man auf ein Zimmer beschränkt, wobei der Abstand des Apparates, (der Linse vom Schirm) etwa = 4 *m* gemacht werden kann und hat die Linse eine Brennweite etwa von 20 *cm*, so ist der Abstand des Gegenstandes von der Linse auch nahezu 20 *cm* (die Berechnung aus der Bildgleichung ergibt 21 *cm*); also ist die Vergrößerung ca. 20fach; hat man Linsen von 10 *cm* Brennweite, so ist die Vergrößerung 40fach u. s. w. So vielmal der Abstand des Schirmes größer ist als die Brennweite, so vielmal (nahezu) ist das Bild größer als der Gegenstand. Auch die Lichtstärke ist zu berücksichtigen, denn bei 10maliger Vergrößerung wird das durch das transparente Bild gehende Licht auf eine 100mal größere Fläche, (bei n maliger Vergrößerung auf eine n^2 mal größere Fläche) ausgebreitet.

In seiner einfachsten Form wird dieser Apparat vielfach als Spielzeug zur Unterhaltung (Zauberlaterne) angewendet. Verbessert dient er als Lehrmittel, um vielen Personen deutliche Bilder interessanter und lehrreicher Abbildungen zu zeigen, und heißt dann wohl auch Skioptikon. Man verwendet zur Beleuchtung dann häufig Drummondsches Kalklicht oder elektrisches Licht und kann dann auch von kleinen Gegenständen große Bilder erzeugen. So wird es dann nahe verwandt mit dem Sonnenmikroskop.

220. Das Sonnenmikroskop.

Der Beleuchtungsapparat des Sonnenmikroskops besteht aus einem Planspiegel, der durch ein Loch im Fensterladen eines verfinsterten Zimmers so ins Freie hinausgesteckt wird, daß

auf ihn die Sonne scheint. Er wird so gestellt, daß die reflektierten Strahlen auf eine Sammellinse fallen parallel der Achse, und kann durch Schrauben in seiner Stellung und Neigung so reguliert werden, daß er dem Lauf der Sonne folgt und die Strahlen stets in der gewünschten Richtung reflektiert. Durch diese Sammellinse, die in der Öffnung des Fensterladens sitzt, werden die Sonnenstrahlen im Brennpunkte vereinigt. Eben dorthin wird ein mikroskopisches Präparat gestellt, ein kleiner interessanter Gegenstand, ein kleines Tierchen, ein Pflanzenteil, kleine Krystalle u. s. w. zwischen zwei

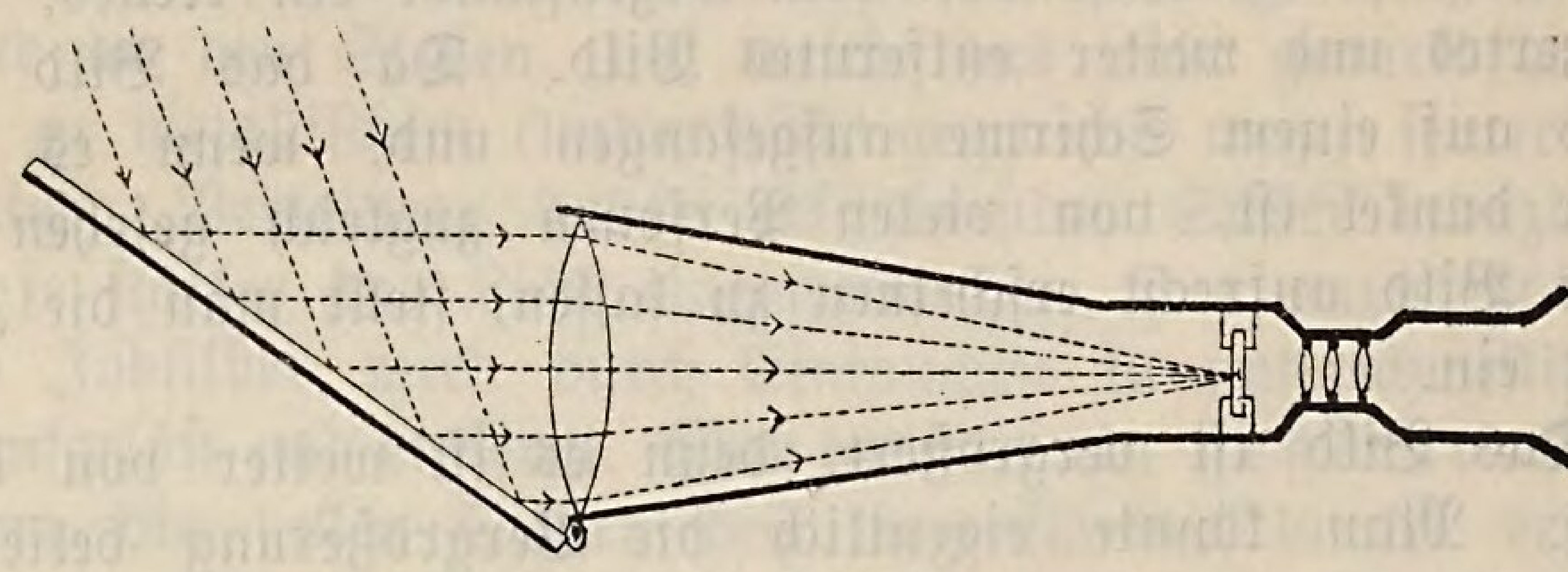


Fig. 280.

Glasplatten eingeschlossen; für starkes Licht ist es meist durchsichtig, wenigstens durchscheinend. Dieser kleine Gegenstand, von dem vereinigten Sonnenlichte beschienen, wird selbst zum leuchtenden Gegenstand, von dem nun ein vergrößertes Bild entworfen werden soll. Dies geschieht durch die Projektionslinse, das ist eine positive Linse von sehr kurzer Brennweite, so gestellt, daß das Präparat im zweiten Raum liegt; dann entwirft die Linse ein reelles, verkehrtes, vergrößertes Bild, das im verfinsterten Zimmer auf dem Schirme aufgefangen werden kann.

Macht man die Brennweite der Projektionslinse sehr klein, dann kann schon bei mäßiger Entfernung des Schirmes (Zimmerbreite), eine sehr starke Vergrößerung erzielt werden, insbesondere da durch das Sonnenlicht eine starke Lichtquelle zur Verfügung steht. Aber bei sehr kurzer Brennweite müßte die Linse sehr klein sein, könnte also nur ein kleines Objekt, oder von einem größeren

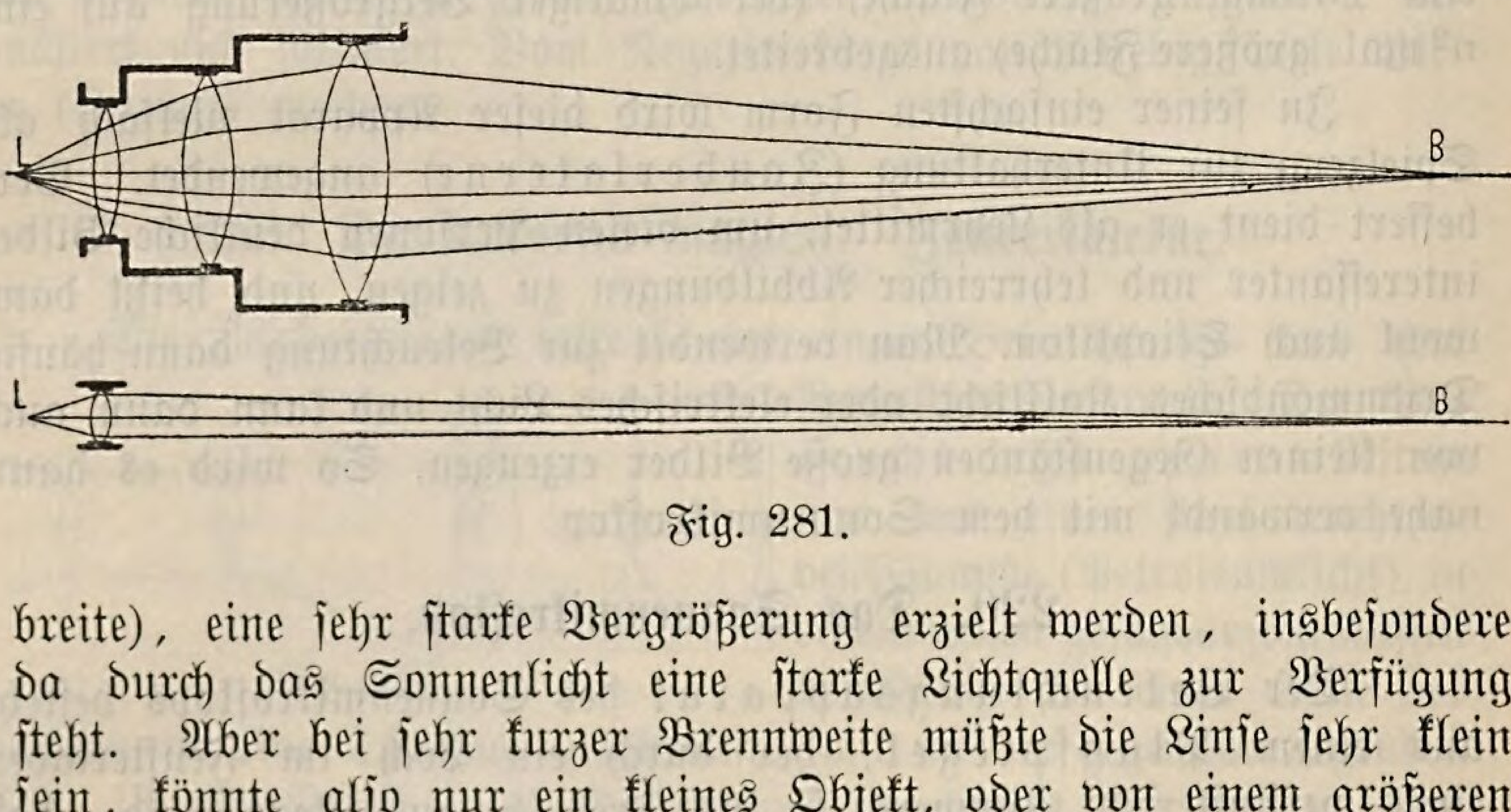


Fig. 281.

nur einen beschränkten Teil auf einmal projizieren. Man benützt deshalb meist eine zusammengesetzte Linse (Fig. 281), bestehend aus zwei oder drei positiven Linsen von etwas größerer Brennweite, nahe hintereinander gestellt; diese wirken ebenso wie eine Linse von sehr kurzer Brennweite, ohne deren Mängel zu haben.

Anstatt des unzuverlässigen Sonnenlichtes benützt man auch eine andere sehr starke Lichtquelle, Drummondsches Kalklicht, elektrisches Licht, sammelt es (verstärkt durch Reflektoren) durch die Sammellinse auf das Präparat und projiziert dieses wie vorher.

Durch solche Apparate können Bilder von ungemeiner Vergrößerung (bis 5000fach) erhalten werden, doch erlangen sie bei weitem nicht die Schärfe und Deutlichkeit der Bilder eines Mikroskopes, so daß das Sonnenmikroskop stets nur zur Demonstration, zur Untersuchung aber stets das Mikroskop angewendet wird.

221. Das Astronomische oder Keplersche Fernrohr.

Das astronomische Fernrohr besteht aus der Objektivlinse und dem Okulare. Die Objektivlinse ist eine große, positive Linse von großer Brennweite. Sie entwirft von fern liegenden Gegenständen, die sich im ersten Raume befinden, ein verkleinertes, reelles, verkehrtes Bild in oder nahe dem ersten Brennpunkte. Das Okular ist eine starke, meistens zusammengesetzte Lupe, mit der man dieses Bild betrachtet. Da die Lupe das vom Objektiv erzeugte verkehrte Bild nicht noch einmal umkehrt, so sieht man die Gegenstände verkehrt.

Die Objektivlinse muß möglichst groß sein, damit sie möglichst viel Licht auffängt und so das Bild lichtstark macht. Von vielen Sternen z. B. kommt in unser Auge so wenig Licht, daß wir dasselbe nicht empfinden, weshalb wir diese lichtschwachen Sterne nicht

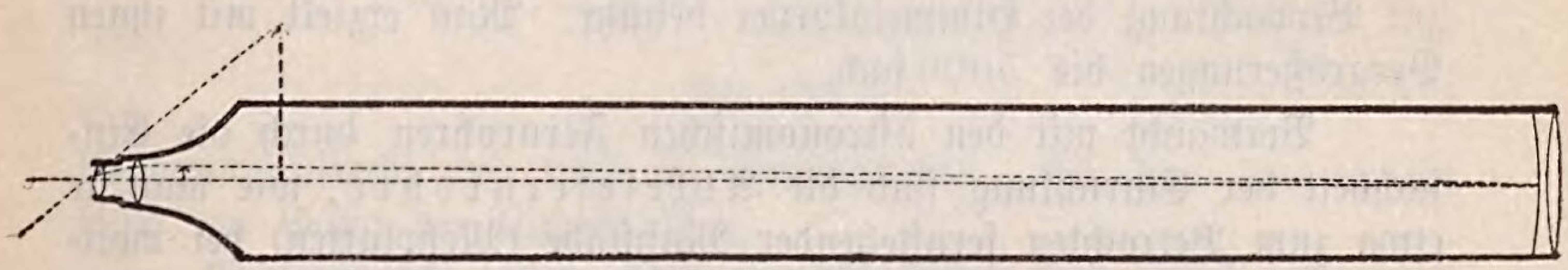


Fig. 282.

sehen; ist aber der Durchmesser der Linse 10mal (n mal) größer als der der Pupille, so trifft auf sie 100mal (n^2mal) mehr Licht, und all dies wird ins Auge geführt, so daß das Auge nun wohl auch solche lichtschwache Sterne sehen kann. Sehr helle Sterne erscheinen dann in großen Fernrohren so hell, daß sie das Auge blenden; bei Betrachtung der Sonne muß daß unerträglich starke Licht durch ein fast undurchsichtiges Glas (Sonnenblende) abgeschwächt werden.

Die Brennweite des Objektives muß möglichst groß sein: das von den Himmelskörpern entworfene Bild ist natürlich entsprechend ihrer großen Entfernung sehr klein, wird aber um so größer, je größer die Brennweite ist. So hat das Bild der Sonne (des Mondes) bei 1 *m* Brennweite einen Durchmesser von 9,2 *mm* (9 *mm*), bei 5 *m* Brennweite 46,0 *mm* (45 *mm*), bei 10 *m* Brennweite 92 *mm* (90 *mm*). Betrachtet man diese Bilder von der Mitte der Objektivlinse aus, so sieht man sie unter demselben Winkel wie die Objektive selbst. Würde man sie mit dem bloßen Auge betrachten, so würden sie, da man sich bis auf die Grenze des deutlichen Sehens, also bis 20 *cm*, nähern könnte, schon größer erscheinen als die Gegenstände selbst (Mond bei 1 *m* Brennweite 5 mal größer, bei 5 *m* ca. 25 mal größer). (Vergleiche Fig. 268.) Vom Nahpunkte aus erscheinen sie so vielmal größer, als die Entfernung des Nahepunktes in der Brennweite enthalten ist, F : n.

Betrachtet man aber diese Bilder mittels einer Lupe (des Okulars), über deren Stellung und Wirkung dieselben Sätze gelten wie früher, so sieht man die Bilder noch vielmal mehr vergrößert, allgemein so vielmal, als die Brennweite der Lupe in der Entfernung des Nahepunktes enthalten ist, n : f, also bei 1 *cm* Brennweite noch 20 mal größer.

Durch Verbindung beider Sätze erhält man: **Das Bild erscheint so vielmal größer als die Brennweite der Lupe in der des Objektivs enthalten ist.** F : f. Sind diese 1 *cm* und 1 *m*, so ist die Vergrößerung 100 fach, d. h. der Gesichtswinkel erscheint 100 mal größer; es schaut so aus, als wenn der Himmelskörper 100 mal näher wäre.

Solche astronomische Fernrohre sind die größten, besten und schärfsten aller bekannten Fernrohre, sie werden auf den Sternwarten zur Beobachtung der Himmelskörper benützt. Man erzielt mit ihnen Vergrößerungen bis 5000 fach.

Verwandt mit den astronomischen Fernrohren durch die Einfachheit der Einrichtung sind die Ablesefernrohre, wie man sie etwa zum Betrachten fernstehender Maßstäbe (Meßplatten) bei manchen Apparaten (Nivellierinstrumenten) benützt. Sie bestehen gleichfalls aus Objektiv und Okular; da man aber auf bedeutende Vergrößerungen hiebei meist verzichtet, so ist ersteres verhältnismäßig klein, letzteres verhältnismäßig groß, so daß oft beide gleich groß sind. In diesem Falle kann das Fernrohr nach beiden Richtungen, rückwärts und vorwärts, zum Durchschauen benützt werden, was für manche Zwecke (Nivellieren) von Vorteil ist. Daß man auch bei ihm alles verkehrt sieht, hat wenig Nachteil, da man auf dem Maßstabe (Meßlatten) die Ziffern umgekehrt anbringen kann und sich auch an das Ablesen verkehrter Ziffern leicht gewöhnt.

222. Das terrestrische oder Erd-Fernrohr.

Im astronomischen Fernrohr sieht man die Gegenstände verkehrt, da man mit der Lupe das umgekehrte Bild betrachtet, und die Lupe dasselbe nicht nochmal umkehrt. Dies stört nicht viel, wenn man etwa Himmelskörper betrachtet; jedoch stört es bedeutend, wenn man irdische Gegenstände betrachtet; deshalb kehrt man das Bild nochmal um, bevor man es durch die Lupe betrachtet. Ein Erdfernrohr ist also folgendermaßen eingerichtet. Es hat ein Objektiv, wie das astronomische Fernrohr; dasselbe entwirft ein verkehrtes,

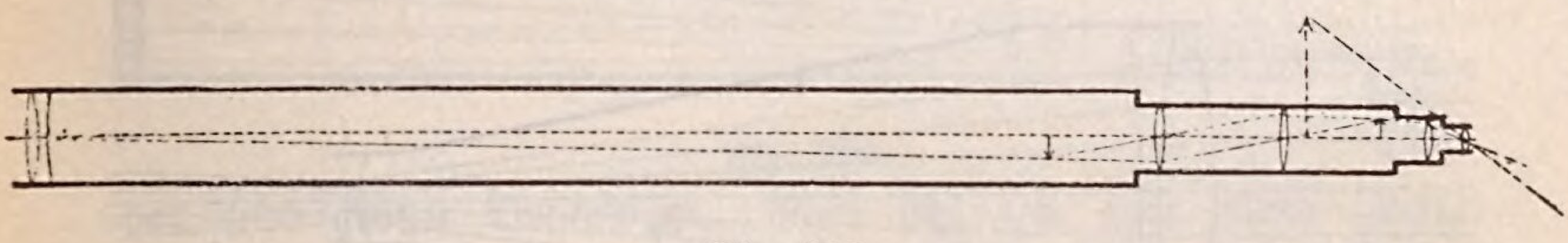


Fig. 283.

verkleinertes Bild nahe dem Brennpunkt: hinter dies Bild wird eine positive Linse von mäßiger Brennweite gestellt, so daß das Bild im Endpunkte der doppelten zwei Brennpunkte (G_2) derselben liegt; dann entwirft diese Linse ein Bild, das im Endpunkte der doppelten ersten Brennweite (G_1) liegt, reell, ebensogroß und nochmal umgekehrt, also nun aufrecht ist. Dies aufrechte Bild betrachtet man mittels des Okulars wie früher. Anstatt nur einer Umkehrlinse verwendet man auch zwei positive Linsen von gleicher Brennweite, von denen die erste vom Bilde um die Brennweite absteht, und die zweite von der ersten auch um die Brennweite absteht. Dies Bild

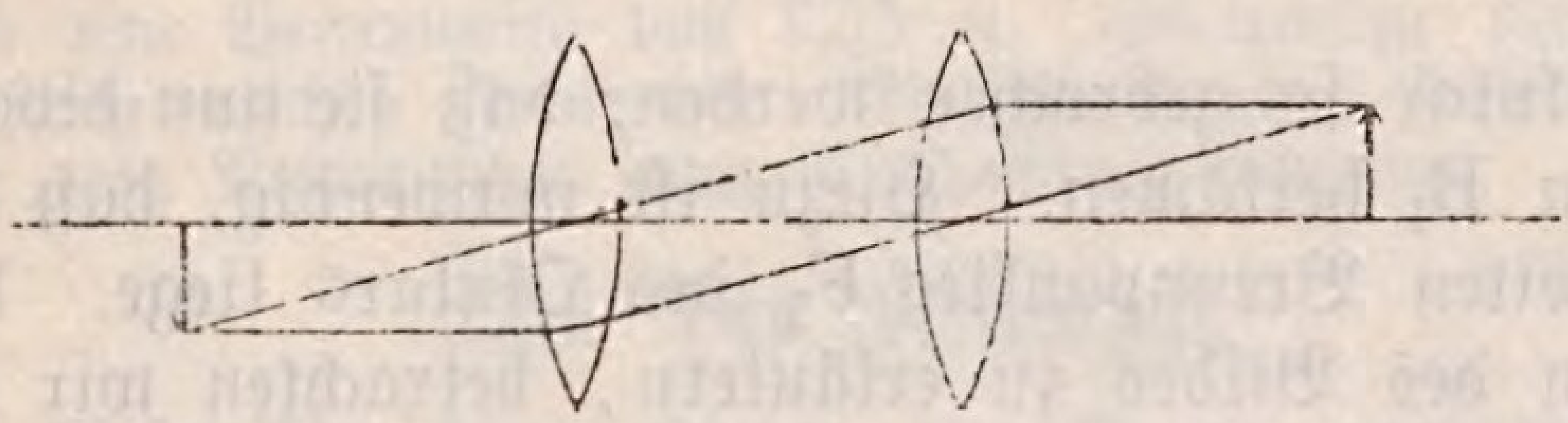


Fig. 284.

ist dann aufrecht und liegt im Brennpunkte. An Fig. 284 ersieht man den Gang der Lichtstrahlen.

Erdfernrohre sollen meist Handfernrohre sein, dürfen demnach weder besonders lang noch schwer sein, können deshalb in der Objektivlinse keine besonders große Brennweite haben und liefern meist nur mäßige Vergrößerung (10—20 fach); doch genügt dieselbe für die gewöhnliche Anwendung.

223. Das galileische oder holländische Fernrohr.

Es wird gewöhnlich als Operngucker, Feldstecher, Jagdfernrohr u. s. w. gebraucht.*)

*) Erfunden vom Brillenmacher Hans Lipperhey in Middelburg (Holland) 1608, verbessert von Galilei.

Es besitzt als **Objektiv** eine **positive Linse von mäßiger Brennweite**, die ein reelles, verkehrtes, verkleinertes Bild erzeugt; aber bevor das Bild zustande kommt, wird in den Gang dieser Lichtstrahlen als **Okular eine negative Linse von kurzer Brennweite** gestellt; diese bricht dann die einfallenden Lichtstrahlen so, daß ein virtuelles, vergrößertes, aufrechtes Bild vor ihr entsteht, das man mit dem Auge betrachtet.

Das Bild kommt auf die Fig. 275,4 dargestellte Art zustande. In Fig. 285 ist zuerst dargestellt, wie die durch das Objektiv gebrochenen Lichtstrahlen auf den Punkt B hin konvergieren, dann aber

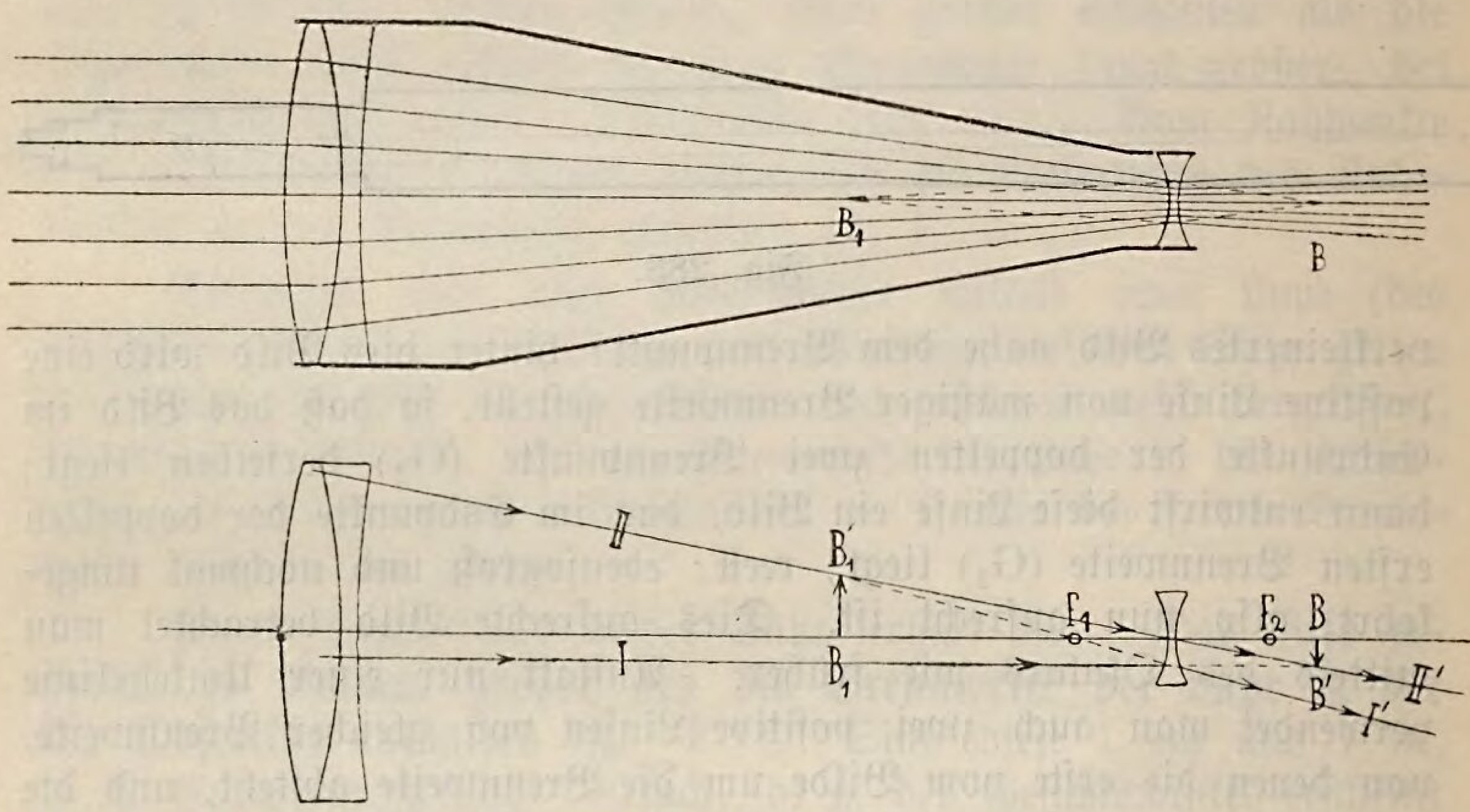


Fig. 285.

durch das Okular so gebrochen werden, daß sie nun divergieren, wie wenn sie von B_1 herkämen. Hiezu ist notwendig, daß B noch jenseits des zweiten Brennpunktes F_2 des Okulars liege. Um das Zustandekommen des Bildes zu erläutern, betrachten wir 2 Strahlen, welche vom Objektiv herkommen und nach B′ hin konvergieren. Der Strahl I geht parallel der Achse und wird so gebrochen nach I′, wie wenn er vom ersten Brennpunkte F_1 herkäme; der Strahl II, welcher durch die Mitte der Linse geht, geht ungebrochen weiter nach II′. Die zwei gebrochenen Strahlen I′ und II′ divergieren, wie wenn sie von dem vor der Linse liegenden Punkte B_1' herkämen. Anstatt des verkehrten, reellen, verkleinerten Bildes BB′ entsteht das aufrechte, virtuelle vergrößerte Bild B_1B_1', welches, wenn es jenseits des Nahepunktes liegt, vom Auge deutlich gesehen wird.

Dies Fernrohr läßt keine bedeutenden Vergrößerungen zu, ist aber für Operngucker (2 bis 4malige Vergr.), Feldstecher (5 bis 8malige Vergr.) u. s. w., wegen seiner einfachen Zusammensetzung, der Kürze des Rohres und der Helligkeit und Größe des Gesichtsfeldes vorzüglich geeignet.

224. Das Spiegelteleskop oder Newtonsche Fernrohr.

Anstatt des Objektivs ist ein großer Hohlspiegel (Silberspiegel) am Grunde des Rohres angebracht. Dieser entwirft von fernen Gegenständen verkleinerte, reelle, verkehrte Bilder in oder nahe dem Brennpunkte. Aus denselben Gründen wie bei dem astronomischen Fernrohre macht man den Hohlspiegel möglichst groß und

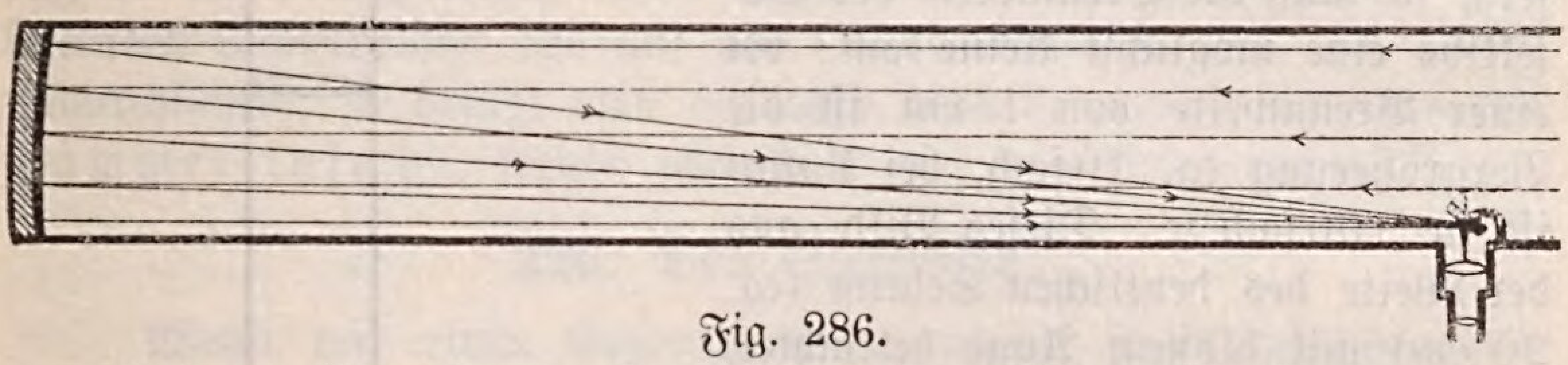


Fig. 286.

von sehr großer Brennweite. Man setzt ihn auch etwas geneigt in den Grund der Röhre, so daß die Bilder nahe an der Seitenwand der Röhre entstehen; etwas vor diesem Bildpunkte wird ein kleiner Planspiegel unter einem Winkel von 45° angebracht, der das Bild durch eine Öffnung der Röhre herauswirft; dort wird es dann mittels eines Okulars, einer starken Lupe, betrachtet.

Solche Spiegelteleskope stehen den großen astronomischen Fernrohren weder an Helligkeit noch an Vergrößerung, sondern nur an Dauerhaftigkeit nach, da der Silberspiegel auch bei sorgfältigster Behandlung mit der Zeit erblindet. Der berühmte Astronom J. Herschel hatte sich ein Riesenfernrohr dieser Art hergestellt und machte mit demselben die großartigen Entdeckungen am Sternhimmel über Mond- und Planetenoberfläche, Doppelsterne, Nebelflecke 2c. zu einer Zeit, in der man Keplersche Fernrohre von ähnlicher Kraft noch nicht zu machen verstand. Sein Spiegel hatte einen Durchmesser von 125 *cm* und eine Brennweite von 12,5 *m*. Heutzutage sind sie verdrängt durch die astronomischen Fernrohre. Ein Keplersches Fernrohr wird auch Refraktor, ein Newtonsches auch Reflektor genannt.

225. Das Mikroskop.

Das Mikroskop dient dazu, um kleine, naheliegende Gegenstände stark vergrößert zu sehen, und hat folgende Einrichtung. Sein

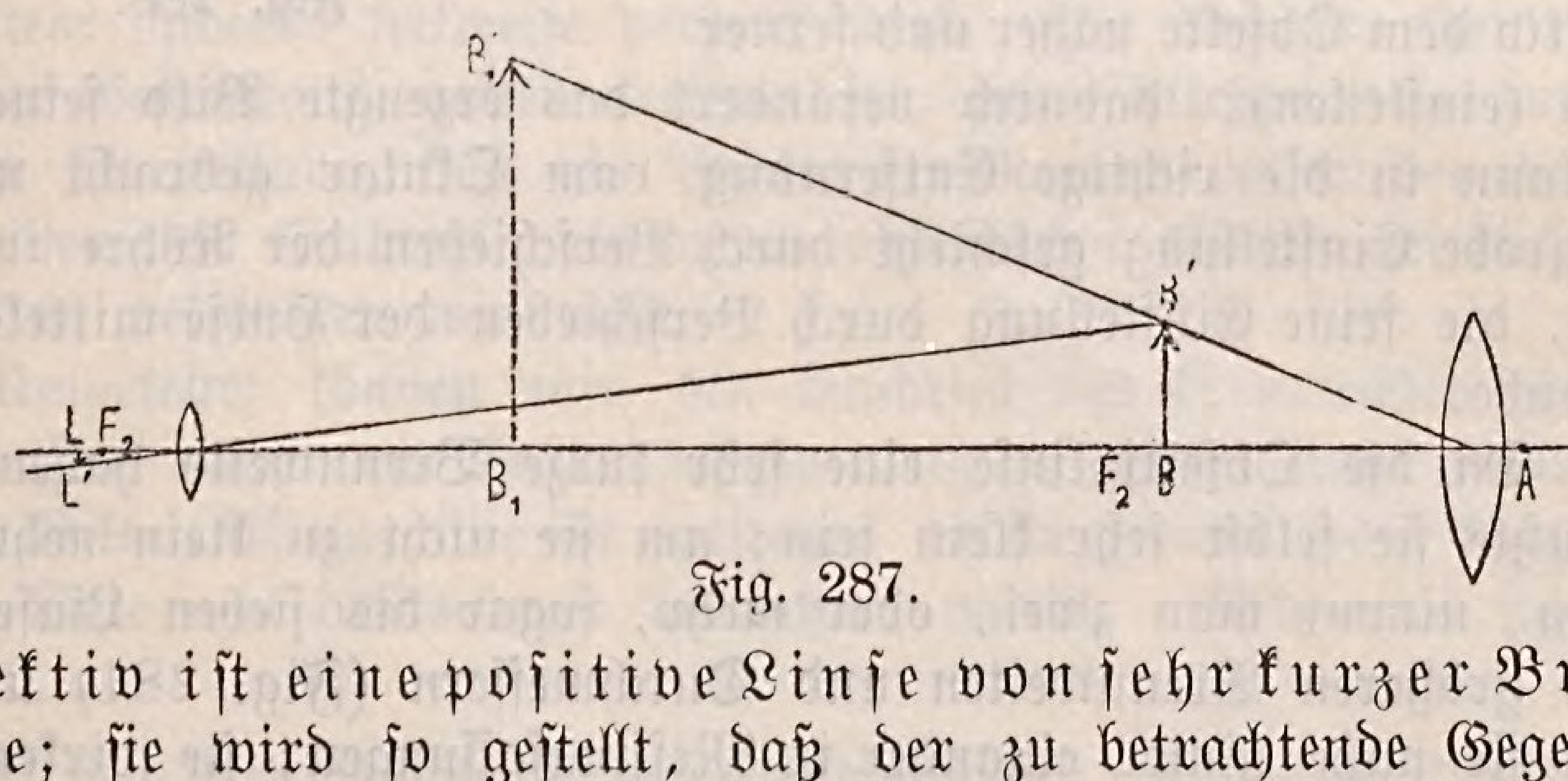
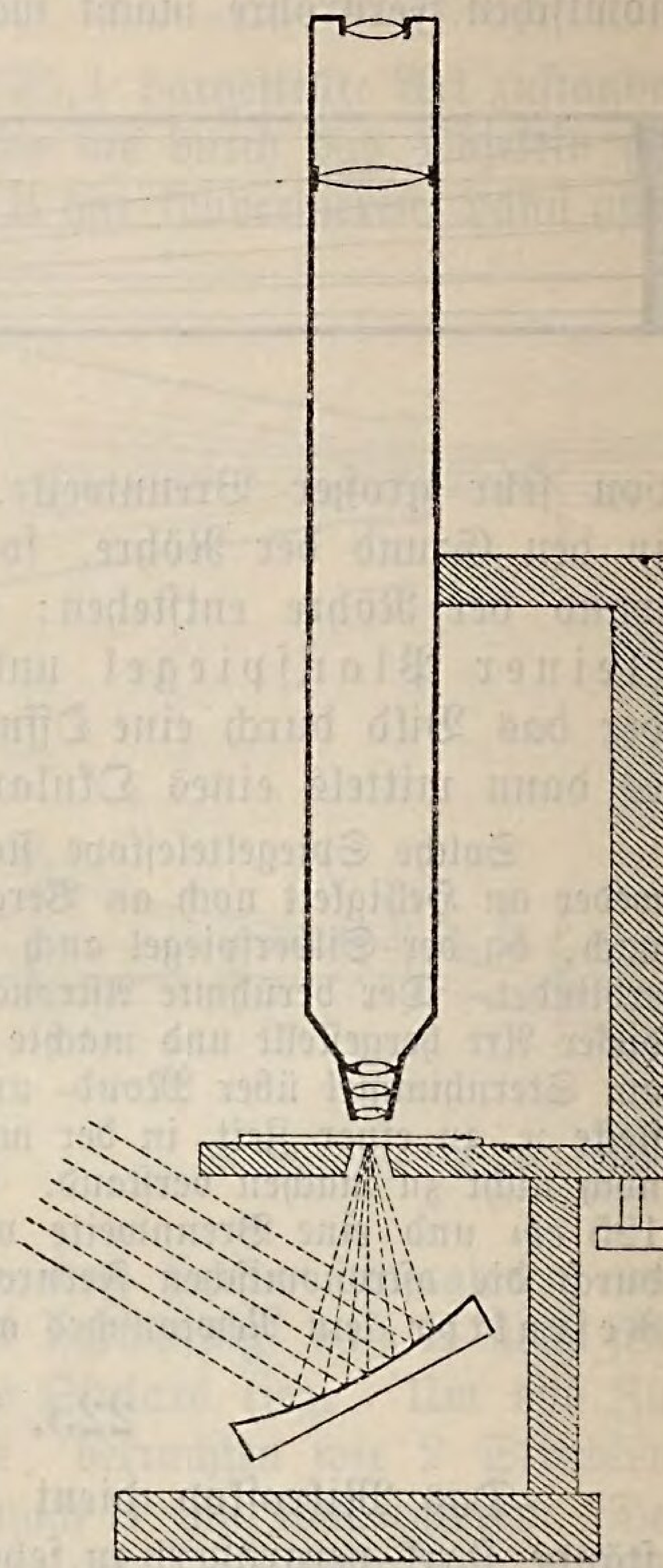


Fig. 287.

Objektiv ist eine positive Linse von sehr kurzer Brennweite; sie wird so gestellt, daß der zu betrachtende Gegenstand (das Objekt, das mikroskopische Präparat) im zweiten Raume liegt,

also zwischen G_2 und F_2; dann entwirft die Linse ein reelles, verkehrtes, vergrößertes Bild zwischen G_1 und dem Unendlichen. Dies Bild betrachtet man mit dem Okulare, einer starken Lupe, sieht es also nochmals vergrößert, aber verkehrt.

Man richtet es gewöhnlich so ein, daß das Bild vom Objektive nur eine mäßige Entfernung hat, etwa 10 *cm*; soll also dies Bild selbst schon bedeutend vergrößert sein, so muß die Brennweite des Objektivs eine möglichst kleine sein; bei einer Brennweite von 1 *cm* ist die Vergrößerung ca. 10fach, bei 1 *mm* ist sie 100fach ꝛc. Dieses Bild, aus der Weite des deutlichen Sehens (ca. 20 *cm*) mit bloßem Auge betrachtet, würde also schon unter einem 10 (resp. 100) mal größeren Gesichtswinkel erscheinen, als das Objekt erscheint, wenn man es mit freiem Auge aus 20 *cm* Entfernung betrachtet. Betrachtet man dies Bild aber mit einer Lupe, die es nochmals 5mal (resp. 20mal) vergrößert, so erscheint es 50 (resp. 2000mal) vergrößert. Daß das Bild verkehrt erscheint, kann dadurch beseitigt werden, daß man das Objekt verkehrt einstellt.


Fig. 288.

Objektiv und Okular sind gewöhnlich an den Enden einer Röhre angebracht, so daß ihr Abstand nicht geändert werden kann. Damit aber das durch das Objektiv erzeugte Bild den richtigen Abstand vom Okular hat, kann man diese Röhre und somit das Objektiv dem Objekte näher und ferner stellen (einstellen); dadurch verändert das erzeugte Bild seine Lage und kann in die richtige Entfernung vom Okular gebracht werden. Die grobe Einstellung geschieht durch Verschieben der Röhre in einer Hülse, die feine Einstellung durch Verschieben der Hülse mittels einer Schraube.

Da die Objektivlinse eine sehr kurze Brennweite haben muß, so müßte sie selbst sehr klein sein; um sie nicht zu klein nehmen zu müssen, nimmt man zwei, oder mehr, sogar bis sieben Linsen von etwas größeren Brennweiten und Durchmessern (Fig. 281) und befestigt sie nahe hinter einander in Messingfassungen; sie wirken dann wie eine Linse von sehr kurzer Brennweite.

Da die betrachteten Objekte sehr klein sind, so senden sie wenig Licht aus, und da dies noch dazu durch die Vergrößerung auf bedeutend größere Flächen ausgebreitet wird, so würden die Bilder zu lichtschwach erscheinen; man muß deshalb das Objekt beleuchten. Dies geschieht bei durchsichtigen oder durchscheinenden Objekten (und das sind die meisten) durch einen kleinen Hohlspiegel, der unterhalb des Objektes so angebracht ist und so gedreht werden kann, daß er die vom Himmel, einer hellen Wolke oder einer Lampe auffallenden Lichtstrahlen alle auf das Objekt reflektiert; ist das Objekt undurchsichtig, so bringt man oberhalb desselben etwas seitwärts eine Sammellinse an, welche viel Licht auf dasselbe vereinigt.*)

226. Das Stereoskop.

Wenn wir einen Gegenstand betrachten, so entsteht von ihm ein reelles Bild auf der Netzhaut, welches die Wahrnehmung vermittelt. Betrachten wir einen körperlichen Gegenstand mit beiden Augen, so sind die beiden Netzhautbilder nicht identisch, sondern wegen der verschiedenen Stellung der Augen zum Gegenstande selbst etwas verschieden; es ist nicht bloß die gegenseitige Lage der Punkte in beiden Bildern eine etwas verschiedene, sondern es kommt auch vor, daß wir manche Flächen oder Flächenteile mit dem einen Auge noch sehen, während wir sie mit dem anderen Auge nicht mehr sehen. Diese Verschiedenartigkeit der Ansichten eines und desselben Körpers kommt uns meistens nicht zum Bewußtsein, da wir nicht darauf achten, doch bewirkt sie, daß wir den Körper als räumlich ausgedehnt sehen, daß wir also den Eindruck bekommen, daß das, was wir sehen, ein räumlich ausgedehnter Körper und nicht bloß eine Fläche sei.

Wenn wir eine Abbildung eines Körpers, eine Zeichnung oder ein Gemälde sehen, so haben wir nie den Eindruck, als wenn wir einen Körper sehen; wir schließen wohl aus der Art der Schattierung, daß die Zeichnung einen Körper von bestimmter Form vorstelle; wir schließen, daß ein Körper weiter entfernt sei, wenn er von einem anderen teilweise verdeckt wird, oder daß ein kleiner gezeichneter Gegenstand weiter entfernt sei; wir schließen also aus der Art der Darstellung, daß die Punkte im Raume verschieden verteilt sind; aber den Eindruck, als wenn ein solcher Körper wirklich vor uns wäre, bekommen wir nicht.

Umgekehrt können wir den Eindruck des körperlichen Sehens hervorrufen, wenn wir dafür sorgen, daß in jedem Auge gerade ein solches Bild entsteht, wie es entstehen würde, wenn jedes Auge von seinem Orte aus den Körper betrachten würde. Man muß sich also

*) Das Mikroskop wurde in Holland erfunden. Daß Zacharias Janssen dasselbe erfunden habe, hat sich als unrichtig herausgestellt.

zwei Abbildungen des Körpers verschaffen, man muß den Körper zweimal abzeichnen, so, wie er mit dem einen Auge betrachtet aussieht, und so, wie er dem anderen Auge erscheint.

Solche von zwei entsprechend weit von einander entfernten Punkten aus aufgenommene Bilder nennt man stereoskopische Bilder.

Um nun bequem mit jedem Auge zugleich je ein Bild ansehen zu können, dazu dient das Stereoskop, erfunden von Wheatstone, verbessert von Brewster.

In ein Kästchen werden unten die beiden Bilder neben einander eingelegt, das Kästchen ist durch eine Scheidewand in zwei Hälften geteilt. Oben sind zwei schwach prismatische Gläser angebracht mit bikonvexen Flächen; sie bewirken (als Prismen), daß wir die beiden Bilder gegen die Mitte gerückt sehen so, als wenn sie von demselben Orte herkämen, und (als schwache Lupen) daß wir die Bilder zugleich etwas vergrößert und in der Akkommodationsweite sehen. Da hiedurch in beiden Augen Netzhautbilder entstehen, welche einem wirklich vorhandenen Körper entsprechen, so hat man den Eindruck, als wenn man den Körper selbst vor sich sähe, man sieht körperlich oder stereoskopisch.

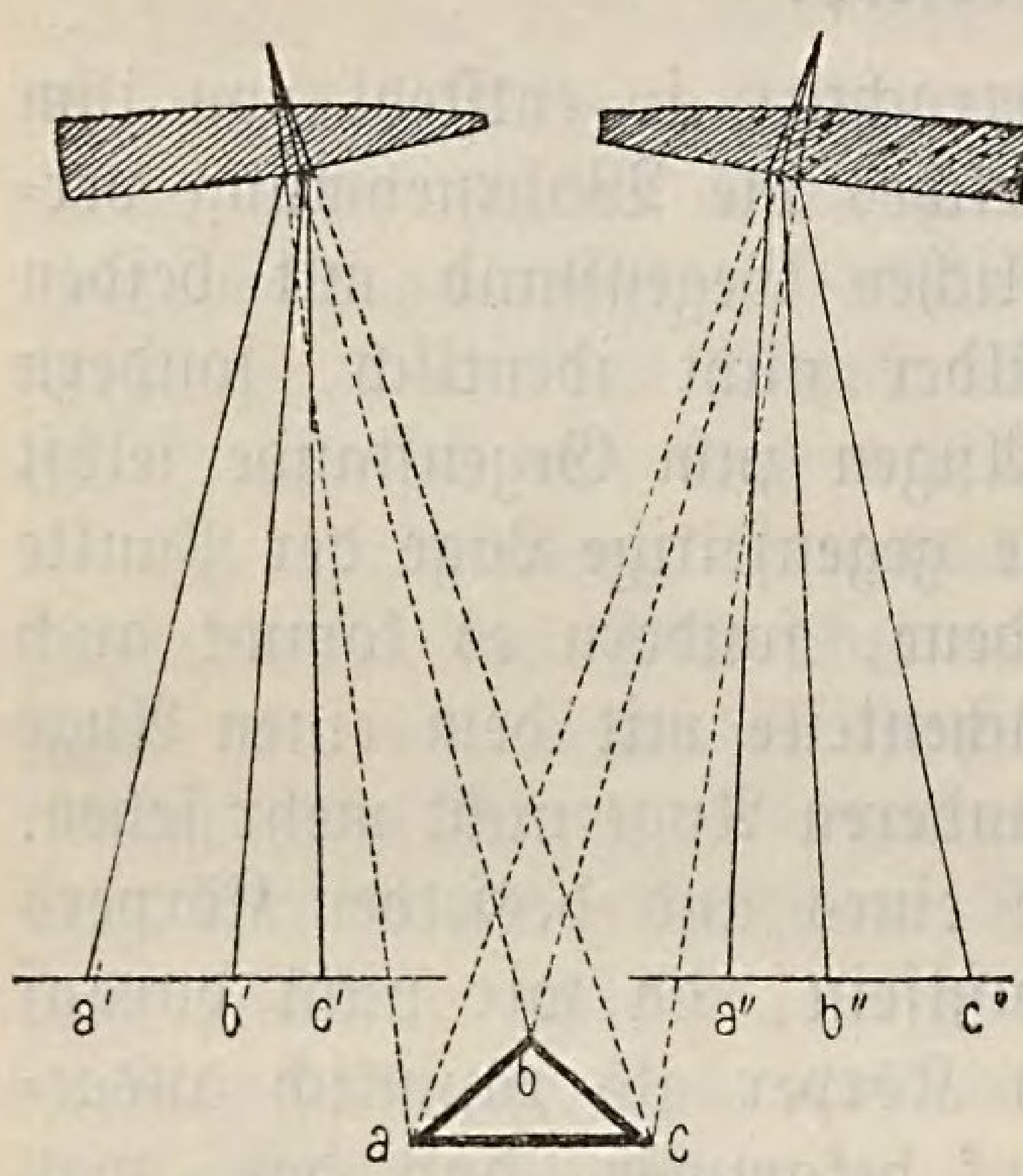


Fig. 289.

In Figur 289 ist durch die Lage von drei Punkten angedeutet, wie die stereoskopischen Bilder des erhabenen Gegenstandes aussehen, und wie deren Lichtstrahlen von den Prismen so abgelenkt werden, als kämen sie vom Gegenstande selbst her.

227. Zerstreuung des Lichtes, Spektrum.

Wenn man weißes Licht, z. B. Sonnenlicht durch ein Prisma gehen läßt, so wird es nicht bloß zerbrochen, sondern auch zerstreut. Man verfinstert das Zimmer, bringt in einem Laden einen (etwa horizontalen) feinen Spalt an (Fig. 290), läßt Sonnenlicht eintreten, und läßt diesen Streifen Sonnenlicht auf ein Glasprisma fallen, welches so gehalten wird, daß seine brechende Kante dem Spalte parallel steht. Das Licht wird gebrochen und kann auf dem Schirme aufgefangen werden; anstatt aber auf dem Schirme einen hellen weißen Fleck zu bekommen, welcher der Länge und Breite des Spaltes entspricht, sieht man ein farbiges Band, das stark in die Breite gezogen ist, während die Länge der des Spaltes noch entspricht. Dieses Farbenband nennt man das Spektrum.

Das Spektrum entsteht auf folgende Art: Das Sonnenlicht ist ein Gemisch ungemein vieler Lichtsorten, die sich durch Farbe und Brechbarkeit unterscheiden. So enthält Sonnenlicht zunächst rotes Licht; es wird am wenigsten gebrochen; deshalb entsteht auf dem Schirme ein roter Streifen, an Länge und Breite dem Spalt entsprechend. Ferner enthält das Sonnenlicht noch rotes Licht von etwas hellerem Rot, das etwas stärker gebrochen wird; deshalb entsteht auf dem Schirme ein Streifen von etwas hellerem Rot, an Länge und Breite wieder dem Spalt entsprechend, aber nicht an derselben Stelle wie der erste Streifen, sondern der Breite nach an den ersten angesetzt; dann kommen ebenso noch mehrere Streifen von immer hellerem Rot und immer größerer Brechbarkeit, die sich deshalb der Breite nach an die vorhergehenden anschließen. Dann kommen orangefarbige Streifen, dann gelbe, grüne, blaue, tiefblaue (ultramarin), schließlich violette.

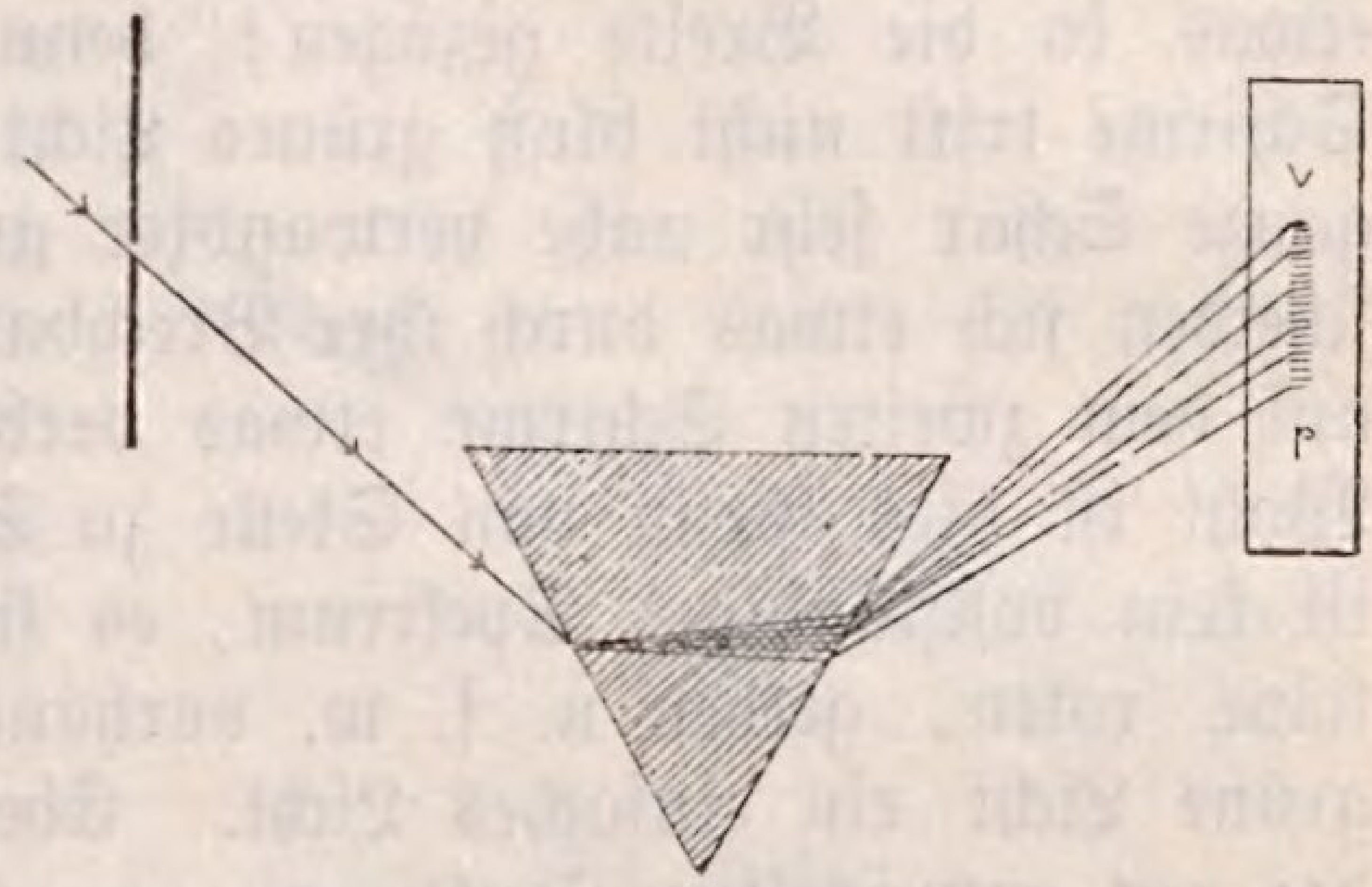


Fig. 290.

Man sagt wohl, daß das Spektrum aus diesen sieben Hauptfarben rot, orange, gelb ꝛc. bestehe; genauer betrachtet sieht man aber, daß es aus unzählbar vielen verschiedenen Farbensorten zusammengesetzt ist, von denen zwei benachbarte sich nur sehr wenig unterscheiden, und die so auf einander folgen, daß sie den Hauptfarben nach in einander übergehen, wie rot in orange ꝛc.

Man darf nicht denken, daß man in dem Spektrum auf dem Schirme all diese ungemein vielen verschiedenen Farbensorten getrennt sehen könne; denn jede Farbensorte gibt auf dem Schirme einen Streifen, dessen Breite der Breite des Spaltes entspricht; zwei benachbarte Farbensorten (z. B. zwei benachbarte von den vielen Tausenden, die im Rot allein vorhanden sind) unterscheiden sich aber in der Brechbarkeit sehr wenig, so daß ihre Streifen auf dem Schirme über einander greifen; ja an jeder Stelle des Spektrums auf dem Schirme greifen viele Tausende benachbarter Streifen über einander. Man muß den Spalt eng machen, wenn man haben will, daß die Streifen der einzelnen Farbensorten nur wenig über einander greifen.

Das weiße Sonnenlicht ist gemischt aus einer Unzahl von verschiedenen Lichtsorten. Diese Lichtsorten unterscheiden sich durch verschiedene Farbe und Brechbarkeit und können durch ein Prisma getrennt werden. Wenn man durch eine Sammellinse diese getrennten Lichtstrahlen wieder vereinigt, so entsteht wieder ein weißer

Streifen. Wenn man in den Schirm etwa dort, wo die grünen Strahlen sich befinden, einen feinen Spalt macht, durch welchen also nur Licht von einer bestimmten Farbensorte durchgeht, und dies nun durch ein zweites Prisma gehen läßt, so wird es wieder gebrochen, aber nicht mehr zerstreut: auf einem zweiten Schirme sieht man wieder einen grünen Lichtstreifen; höchstens ist dieser Lichtstreifen etwas in die Breite gezogen; denn durch den Spalt im ersten Schirme tritt nicht bloß grünes Licht von einer Sorte, sondern eine ganze Schar sehr nahe verwandter grüner Lichtsorten; diese unterscheiden sich etwas durch ihre Brechbarkeit, also erscheint der Streifen auf dem zweiten Schirme etwas verbreitert, aber doch nur grün. Wohl ist dies Grün von Stelle zu Stelle etwas verschieden, aber es ist kein vollständiges Spektrum, es sind bloß grüne Strahlen, aber keine roten, gelben u. s. w. vorhanden. Man nennt daher dieses grüne Licht ein einfaches Licht. Ebenso enthält jede andere Stelle des gut entwickelten Spektrums nur einfaches, homogenes Licht.

Eine solche Zerlegung des Lichtes in die einzelnen Farben desselben nennt man Zerstreuung des Lichtes oder Dispersion; sie tritt bei jeder Brechung ein, nicht bloß bei Glas, sondern auch bei Wasser u. s. w. All diese genaueren Untersuchungen über die Zerstreuung des Lichtes wurden zuerst von Newton gemacht.

228. Folgerungen aus der Zerstreuung des Lichtes.

Unter Brechungskoeffizient haben wir verstanden das Verhältnis $\frac{\sin i}{\sin r}$; nun haben wir aber, da das Licht bei der Brechung auch zerstreut wird, in unseren Versuchen stets denselben Einfallswinkel und doch verschiedene Brechungswinkel; der Brechungswinkel des roten Lichtes ist der kleinste, der des gelben größer u. s. f., der des violetten der größte. Wir erhalten also für die verschiedenen Farbensorten verschiedene Brechungskoeffizienten. Z. B. eine bestimmte Glassorte, Crownglas (Kronglas) hat als Brechungskoeffizient für rote Strahlen 1,526, für violette 1,547.

Die mit jeder Brechung des Lichtes verbundene Farbenzerstreuung verursacht folgende Erscheinungen: Wenn wir durch ein Prisma das durch den Spalt einfallende Licht anschauen, so sehen wir den Spalt verbreitert und das Farbenband zeigt die Spektralfarben; betrachten wir irgendwelche andere Gegenstände durch das Prisma, so sehen wir besonders die Ränder mit Spektralfarben eingesäumt.

Auch der Regenbogen entsteht durch Zerstreuung des Lichtes, verbunden mit Reflexion (Erklärung zuerst von Descartes 1637). Einen Regenbogen können wir bekanntlich sehen, wenn wir die Sonne hinter uns, herabfallende Regentropfen (eine Regenwand) vor uns haben, und die Sonne auf diese Regentropfen scheint. Diejenigen

Lichtstrahlen, welche uns den Regenbogen bilden, machen dabei folgenden Weg (Fig. 291). Sonnenstrahlen dringen etwas seitwärts in den (kugelförmigen) Regentropfen, werden also gebrochen und etwas zerstreut; sie treffen nun die hintere Wand des Tropfens und werden dort reflektiert; sie treffen dann die andere seitwärts liegende Stelle, werden dort nochmals gebrochen und wieder zerstreut, so daß sie doppelt so stark zerstreut sind. Befindet sich unser Auge in dem Raume, welchen diese zerstreuten Strahlen einnehmen, so treffen in unser Auge etwa bloß die grünen Strahlen dieses Spektrums; wir sehen diesen Regentropfen grün; von Tropfen, die sich weiter auswärts befinden, sehen wir nur die gelben bis roten, von Tropfen, die sich weiter nach einwärts befinden, bloß die blauen, violetten Strahlen; deshalb sehen wir ein Farbenband mit all den Spektralfarben, die man deshalb auch Regenbogenfarben nennt. Da für alle Regentropfen, die in bezug auf uns und die Sonne dieselbe Lage haben, dasselbe stattfindet, solche Regentropfen aber in einem Kreisbogen liegen, so sehen wir den Regenbogen kreisförmig; sein Mittelpunkt liegt in der Linie, die durch die Sonne und unser Auge geht. Da die Sonne nicht bloß ein leuchtender Punkt, sondern ein verhältnismäßig großer Fleck ist, so sind die Spektralfarben im Regenbogen nicht rein, sondern vielfach in einander geschoben, was zur Helligkeit des Regenbogens wesentlich beiträgt.

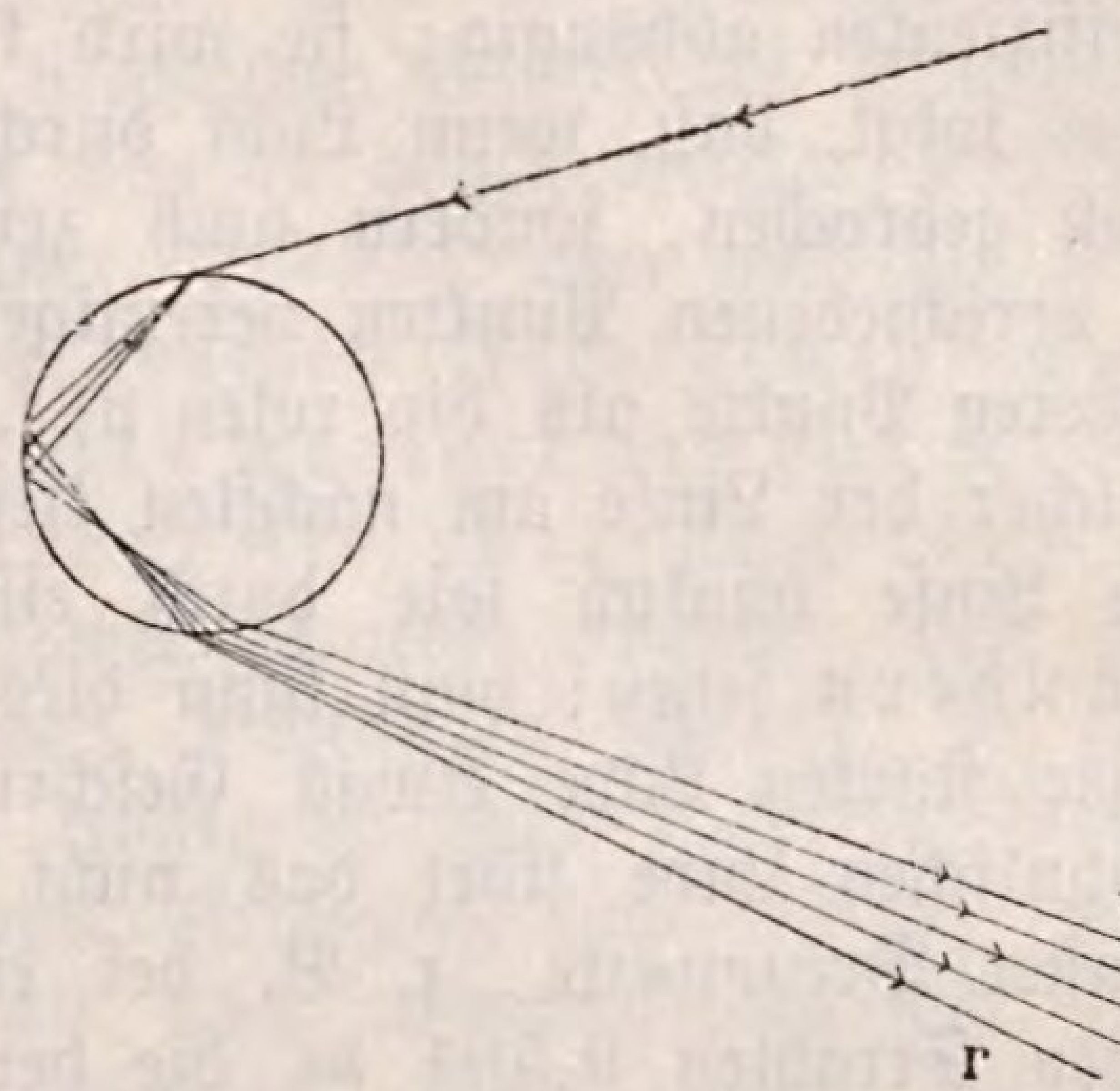


Fig. 291.

Häufig sieht man außer dem inneren noch einen weniger hellen, äußeren Regenbogen, dessen Farben in umgekehrter Reihenfolge angeordnet sind (rot innen); er entsteht auf ähnliche Weise, nur werden die Lichtstrahlen im Innern der Tropfen zweimal reflektiert, wodurch sie an Helligkeit verlieren.

Auch Tautropfen sieht man, wenn sie von der Sonne beschienen werden, oft in Farben funkeln; bewegt man das Auge etwas nach rechts und links, so kann man leicht denselben Tropfen nacheinander in allen prismatischen Farben funkeln sehen. Auch in der Wolke von Wasserstaub (runden kleinen Wassertropfen), die sich bei einem Wasserfalle oder einer starken Fontäne bildet, kann man leicht einen Regenbogen beobachten.

Es mag noch erwähnt sein, daß die hier gegebene Erklärung des Regenbogens nicht vollständig ist, daß aber das noch fehlende ohne größere mathematische Hilfsmittel nicht gegeben werden kann.

229. Zerstreuung des Lichtes bei Linsen.

Die Brennweite einer Linse ist wesentlich vom Brechungskoeffizienten abhängig; sie wird kleiner, wenn er größer wird; daraus folgt, daß, wenn Licht durch eine Linse geht, und dabei nicht bloß gebrochen, sondern auch zerstreut wird, die Lichtstrahlen sich in verschiedenen Punkten vereinigen, die gelben in einem der Linse näheren Punkte als die roten u. s. w., die violetten in einem Punkte, welcher der Linse am nächsten liegt. Dies bewirkt, daß wir durch die Linse ähnlich wie durch ein Prisma alles mit farbigen Rändern sehen; man kann dies leicht beobachten, wenn man mit einer starken Lupe etwas Geschriebenes betrachtet. Bei einer gewöhnlichen Lupe stört das nicht viel, wohl aber bei Linsen mit großer Brennweite, z. B. bei einer Linse ist die Brennweite der roten Strahlen 9,501 *m*, die der violetten 9,148 *m*, hält man in den Brennpunkt der violetten Strahlen einen Schirm, so haben sich in diesem Brennpunkte erst die violetten Strahlen vereinigt, die anderen aber noch nicht, diese gehen großenteils an diesem Punkte vorbei und bilden auf dem Schirm einen Zerstreuungskreis von farbigen Ringen, deren äußerster rot ist, und dessen Durchmesser 6 *mm* beträgt, wenn der Linsendurchmesser 20 *cm* ist. Bei einer solchen Linse würde man also das Bild eines Sternes nicht als scharfen deutlichen Punkt, sondern als Mittelpunkt eines verhältnismäßig sehr großen Kreises von farbigen Ringen sehen; er würde vollständig verschwommen erscheinen, ein derartiges Fernrohr wäre vollständig unbrauchbar. Auch das Auge ist mit diesem Fehler behaftet und hat Farbenzerstreuung; ein Auge, welches für rote Strahlen auf unendliche Entfernung eingestellt ist, hat im Violett nur eine Sehweite von ca. 60 *cm*; jedoch ist im weißen Lichte diese Farbenzerstreuung nicht merklich und nicht störend.

230. Achromatische Prismen und Linsen.

Man ist im stande, Linsen herzustellen, welche das Licht wohl brechen, aber nicht mehr zerstreuen. Wenn man nämlich verschiedene Glassorten untersucht, so findet man, daß sie das Licht verschieden stark brechen und auch verschieden stark zerstreuen. So sind zur Herstellung der Linsen für optische Apparate besonders zwei Glassorten im Gebrauche, das Kronglas, ein bläulichgrünes Natron-Kalkglas, und das Flintglas, ein farbloses, schweres Kali-Bleiglas. Macht man sich aus beiden Glassorten Prismen von etwa je 60° brechendem Winkel, so beträgt beim Kronglasprisma die Ablenkung der roten Strahlen 39° 26′, die der violetten 41° 19′; also beträgt die Zerstreuung (Winkel zwischen den roten und den violetten Strahlen) 1° 53′; beim Flintglasprisma

beträgt die Ablenkung der roten Strahlen 55°32; die der violetten 59°36′, die Zerstreuung also 4°4′. Es ist demnach die Brechung im Flintglasprisma nur etwas größer, aber die Zerstreuung bedeutend größer. Macht man den brechenden Winkel des Flintglasprismas kleiner (35°11′), so kann man es dahin bringen, daß die Ablenkung der roten Strahlen kleiner (28°39), aber doch die Zerstreuung dieselbe (1°53) ist. Ein solches Flintglasprisma (von 35°) bricht also die Strahlen weniger als das Kronglasprisma (von 60°), zerstreut sie aber noch eben so stark. Stellt man nun beide Prismen so neben einander, daß ihre brechenden Kanten nach verschiedenen Richtungen schauen, so daß das Flintglas die Strahlen nach entgegengesetzter Richtung bricht, so werden die roten Strahlen vom Kronglase um 39°26′ nach abwärts, vom Flintglase um 28°39′ nach aufwärts abgelenkt, sind also um 10°47′ abgelenkt nach abwärts; ebenso werden die violetten Strahlen vom Kronglas um 39°26′ + 1°53′ abgelenkt nach abwärts und vom Flintglas um 28°39′ + 1°53′ nach aufwärts, sind also auch um 10°47′ nach abwärts gelenkt. Es verlassen also die roten und violetten Strahlen das Prisma unter demselben Winkel, also parallel, und sind nicht mehr zerstreut: ähnliches gilt, wenn auch nicht vollständig genau, für die zwischen Rot und Violett liegenden Strahlen. Das Licht wird also durch ein solches Prismenpaar wohl noch abgelenkt, aber nicht mehr zerstreut. Ein solches Prismenpaar nennt man ein achromatisches (nicht färbendes) Prisma (Fig. 292). Auf ähnliche Weise wird die achromatische Linse hergestellt, die das Licht noch bricht, aber nicht mehr zerstreut. Sie besteht (Fig. 293) aus einer positiven Kronglaslinse und einer negativen Flintglaslinse von größerer Brennweite, aber derselben zerstreuenden Kraft. Durch die negative Flintglaslinse wird die Brechung der Kronglaslinse nicht ganz aufgehoben, so daß das Linsenpaar noch wie eine positive Linse wirkt, aber die Zerstreuung wird fast ganz aufgehoben. Solche achromatische Linsen verwendet man bei allen besseren optischen Instrumenten, Fernrohren, Mikroskopen und photographischen Apparaten.

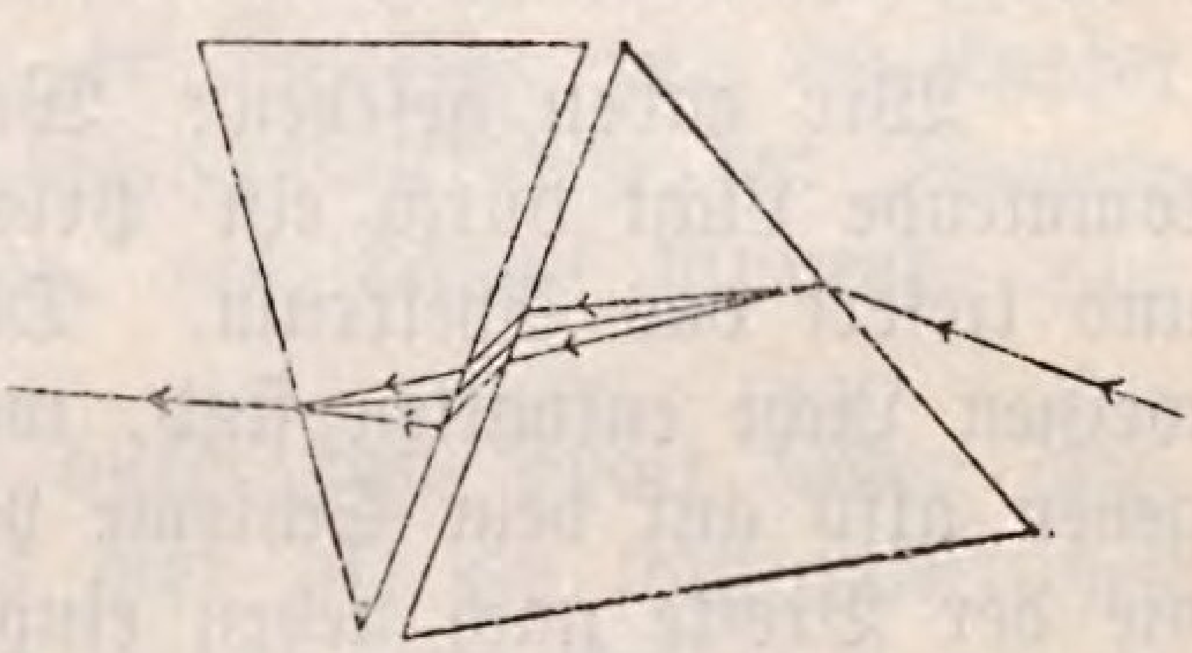


Fig. 292.

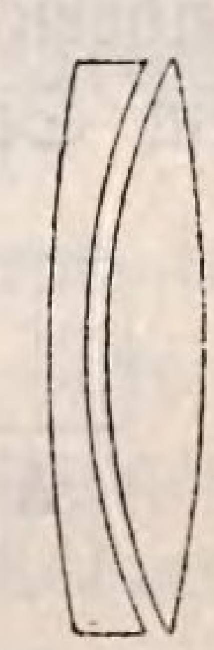


Fig. 293.

Vor der Erfindung dieser achromatischen Linsen durch Dollond (Engländer ca. 1750) konnte man wegen der starken Farbenzerstreuung keine Fernrohre mit starker Vergrößerung machen. Man gab vordem den Objektivlinsen sehr große Brennweiten; Toricelli stellt eine her von 10 *m* Brennweite (noch vorhanden). Huygens verbesserte die Objektivlinsen und entdeckte den sechsten Saturnmond und den Saturnring. Compani führte im

Auftrage Ludwig XIV. Teleskope aus von 86, 100, 136 Pariser Fuß Newton, der an der Möglichkeit achromatischer Linsen verzweifelte, stellte das Spiegelteleskop her 1668 (schon 1664 von Gregory angegeben), das bei viel kürzerer Rohrlänge viel bessere Bilder erzeugt. Erst Fraunhofer hat erfunden, wie man die Glasmassen insbesondere des Flintglases in größeren Stücken und in der erforderlichen absoluten Reinheit herstellt, und hat es verstanden, Linsenpaare zu berechnen und herzustellen, die möglichst gut achromatisch waren, über die bis dahin gebräuchlichen Größen weit hinaus gingen und auch jetzt noch zu den vorzüglichsten gehören.

Außer der chromatischen Abweichung leiden größere Linsen auch noch stark an der sphärischen Abweichung, welche darin besteht, daß wegen der rein sphärischen Gestalt der Krümmungsflächen die Randstrahlen nicht genau in demselben Punkt vereinigt werden wie die Zentralstrahlen. Man kann (nach Steinheil) bei achromatischen Linsen dafür sorgen, daß diese Abweichung, wenn nicht ganz beseitigt, so doch möglichst klein gemacht wird. Eine so konstruierte achromatische Linse heißt eine aplanatische Linse oder ein Aplanat. Schon jeder bessere photographische Apparat hat einen Aplanat als Objektiv.

231. Fraunhoferſche Linien.

Wir haben gesehen: Wenn das von einem schmalen Spalt kommende Licht durch ein Prisma geht, so wird dasselbe zerstreut und liefert das Spektrum. Die verschiedenen Farbenarten, die im weißen Licht enthalten sind, werden verschieden stark gebrochen und geben also auf dem Schirme verschiedene Abbildungen des Spaltes, die der Breite nach neben einander liegen.

Wenn man nun den Spalt sehr eng macht, paralleles (Sonnen-) Licht durchgehen läßt und es sehr stark zerstreut, indem man es mehrmals in demselben Sinne durch Prismen brechen läßt, so zeigt sich, daß das Spektrum das Sonnenlichtes kein kontinuierliches ist, sondern durch eine große Anzahl dunkler Linien (parallel dem Spalte) unterbrochen ist. Diese von (Wollastone und) Fraun-

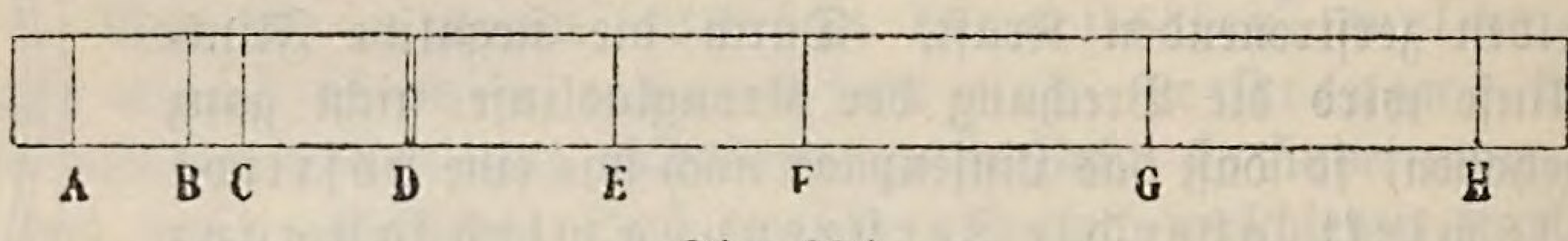


Fig. 294.

hofer entdeckten Linien heißen die Fraunhoferschen Linien. Man schließt, daß diejenige Lichtsorte, die bei der Brechung auf die Stelle der dunklen Linie treffen sollte, im Sonnenlichte nicht vorhanden ist. Fraunhofer hat die 8 auffallendsten (breitesten) dieser Linien (besser Liniengruppen) mit den Buchstaben A, B, C, D, E, F, G, H bezeichnet, aber noch eine große Anzahl (500) feinerer Linien gefunden 1814, und von

anderen (insbesondere Kirchhoff) ist noch eine große Anzahl gefunden und nach ihrer gegenseitigen Lage und Entfernung gemessen worden.

232. Spektra glühender Stoffe.

Läßt man nicht Sonnenlicht, sondern Licht eines weißglühenden festen (oder flüssigen) Körpers durch den Spalt fallen, so erhält man ein kontinuierliches Spektrum ohne dunkle Linien; man schließt also, jeder weißglühende, feste oder flüssige Körper sendet Lichtstrahlen von allen möglichen Sorten aus. Fängt der Körper erst an zu glühen (rotglühend), so sendet er bloß rote Lichtstrahlen aus; wächst seine Hitze, so treten die nächstfolgenden Strahlen orange, dann gelb und so fort dazu; erst bei Weißglut sendet er alle Lichtstrahlen aus.

Ganz anders verhalten sich glühende Dämpfe. Solche verschafft man sich folgendermaßen: Man nimmt eine Spirituslampe oder einen Bunsenschen Brenner, die beide mit einer sehr wenig leuchtenden Flamme brennen, bringt an einen Platindraht etwas Kochsalz oder Potasche oder ein Kupfersalz oder irgend welche Salze von Metallen und hält ihn in die Flamme; die Flamme zeigt dann eine gewisse Farbe, bei Kochsalz gelb, bei Potasche rot, bei Kupfer grün ꝛc., da ein Teil des Salzes in der großen Hitze der Flamme verdampft, sich zersetzt, und das Metall, als Dampf glühend, eine gewisse Lichtart ausstrahlt.

Wenn man nun solches Licht durch den Spalt fallen läßt und durch ein Prisma zerlegt, so erhält man nie ein kontinuierliches Spektrum, sondern stets nur eine oder einige helle Linien von ganz bestimmter Farbe, so erhält man beim Kochsalze eine Linie (zwei sehr benachbarte) in Gelb und nennt sie die Natriumlinie, weil sie herrührt von den in der Flamme glühenden Natriumdämpfen. Ein Kaliumsalz liefert eine helle Flamme in Rot, Lithion eine in Orange u. s. f. Allgemein **jedes in Dampfform glühende Metall liefert ein bloß aus einzelnen Linien bestehendes Spektrum.**

Gase oder Dämpfe von Flüssigkeiten macht man glühend in den von Geißler erfundenen Geißlerschen Röhren. Diese Glasröhren sind in der Mitte zu einer dünnen Röhre ausgezogen und an ihren Enden sind Platindrähte eingeschmolzen; die Röhren werden mit einer gewissen Gasart gefüllt, dies Gas wird dann bis auf einen kleinen Rest ($^1/_{100}$) wieder ausgepumpt und nun wird die Röhre zugeschmolzen. Man läßt nun mittels der Platindrähte die Induktionsfunken eines kräftigen Rumkorffschen Induktionsapparates durch das Gas schlagen; dadurch wird das Gas glühend. Durch das Prisma untersucht, gibt es nie ein kontinuierliches Spektrum, sondern jedes Gasspektrum liefert eine oder einige helle Linien; man schließt also, **glühendes**

Gas sendet nur Lichtstrahlen von bestimmter Art und bestimmter Brechbarkeit aus.

Die Kenntnis dieser, für die glühenden Dämpfe insbesondere der Metalle charakteristischen hellen Linien kann dazu dienen, um das Vorhandensein eines solchen Metalles in irgend einem Stoffe nachzuweisen; denn bringt man etwas von dem Stoffe mittels des Platindrahtes in die Weingeistflamme, untersucht deren Licht durch Zerlegung mittels des Prismas und findet in dem Spektrum die *charakteristischen hellen Linien* etwa des Natriums, so ist zu schließen, daß Natrium in dem Stoffe enthalten ist. Auf diesem Wege sind vier bis dahin unbekannte Metalle entdeckt worden. Als sich nämlich in einem Spektrum helle Linien zeigten, die keinem der bisher bekannten Metalle angehörten, war zu schließen, daß sie einem neuen Metalle angehören; so fand man das Rubidium, Cäsium (Kirchhoff und Bunsen), Thallium und Indium.

233. Spektralanalyse.

Kirchhoff fand ferner, *daß die meisten der hellen Linien der Metallspektra gerade an den Stellen sich befinden, wo im Sonnenspektrum dunkle Linien vorhanden sind.* Der nächstliegende Schluß, daß also diese Stoffe auf der Sonne nicht vorhanden sind, ist jedoch falsch und gerade das Umgekehrte ist richtig, wie aus folgendem ersichtlich ist.

Wenn man eine Natriumflamme (Weingeistflamme mit Kochsalz) herstellt, so zeigt sie im Spektrum die charakteristische helle Linie in Gelb. Wenn man aber hinter der Natriumflamme einen weißglühenden Körper, z. B. einen Platindraht bringt, das Licht dieses Platindrahtes durch die Natriumflamme gehen läßt und nun mit dem Prisma untersucht, so erhält man nicht das kontinuierliche Spektrum, das dem glühenden Platin eigentlich entsprechen sollte, sondern das Spektrum zeigt *eine dunkle Linie gerade dort, wo die helle Linie des Natriums sein sollte.* Dies hat man sich folgendermaßen zu erklären: Die Natriumflamme läßt alle Lichtstrahlen des glühenden Platins durch, deshalb erscheint dessen kontinuierliches Spektrum; aber *gerade diejenigen (gelben) Strahlen des Platins, welche die Flamme selbst ausstrahlt, läßt sie nicht durch,* sondern sie absorbiert dieselben; *ein glühendes Gas absorbiert alle die Strahlen* (läßt sie nicht durch), *die es sebst aussendet.* An der Stelle dieser gelben Strahlen sind also nicht die vom Platin ausgehenden gelben Strahlen, wohl aber die von der Flamme selbst ausgehenden gelben Strahlen; letztere sind aber, wenn die Glühhitze in der Flamme geringer ist als die des glühenden Platins, schwächer als erstere; deshalb erscheint im Spektrum an Stelle dieser gelben Strahlen

eine dunkle Linie, Absorptionslinie; diese ist jedoch nicht ganz dunkel, sondern nur dunkler als die benachbarten Stellen; denn die benachbarten Stellen erhalten das helle Licht des glühenden Platins, die dunkle Stelle jedoch nur das viel schwächere Licht der glühenden Flamme. So sind auch die Fraunhoferschen Linien im Sonnenspektrum nicht schwarz, sondern nur dunkler als die benachbarten Stellen.

Da nun das Sonnenspektrum im allgemeinen ein kontinuierliches (nicht bloß aus einzelnen hellen Streifen zusammengesetztes) ist, so folgt, daß die Sonne ein glühender, fester (oder wegen der großen Hitze flüssiger) Körper sei; da sich aber in diesem kontinuierlichen Spektrum der Sonne sehr viele dunkle Linien zeigen, so folgt, daß der flüssige, glühende Kern derselben mit einer Hülle dampfförmiger glühender Gase von niedriger Temperatur umgeben sei, die gerade diejenigen Strahlen des glühenden Kernes absorbirt, die sie selbst ausstrahlt, und so die dunklen Linien (Absorptionslinien) hervorbringt. Da nun, wie Kirchhoff fand, gerade an der Stelle der gelben Natriumlinie im Sonnenspektrum eine dunkle Linie ist, so folgt, daß Natriumdämpfe in der Sonnenatmosphäre enthalten sind; ebenso sind Kalium, Kalcium, Magnesium, Nickel, Eisen, Mangan und Chrom auf der Sonne anwesend. Eisendampf hat eine sehr große Anzahl (über 700) heller Linien, jeder derselben entspricht genau an derselben Stelle eine dunkle Linie im Sonnenspektrum. Auch Wasserstoff ist in der Sonnenatmosphäre enthalten, dagegen fehlen sicher Gold, Silber, Blei, Zinn, Antimon, Quecksilber, Silicium, Lithium u. a. m.

Untersucht man ebenso die Spektra der Fixsterne, so zeigen sich in denselben meist ähnliche dunkle Linien wie bei der Sonne; man fand so z. B. daß Sirius und Aldebaran sicher Natrium, Magnesium und Eisen enthalten. Untersucht man die Nebelflecke, so zeigen diejenigen, die sich im Fernrohre als Sternhaufen auflösen lassen, stets ein kontinuierliches Spektrum, man schließt, daß sie aus einzelnen glühenden, flüssigen Körpern bestehen; von den Nebeln aber, die sich nicht auflösen lassen, zeigen manche die hellen Lenien glühender Gase.

234. Farben dunkler Körper. Komplementäre Farben.

Die Farben eines gut entwickelten Spektrums nennt man einfach oder homogen, weil die an einer beliebigen Stelle des Spektrums vorhandenen Lichtstrahlen gleichartig sind und sich nicht weiter zerlegen lassen.

Anders verhält es sich mit den Farben der uns umgebenden Körper. Wir nennen einen Körper weiß, wenn er von allen auf ihn fallenden Lichtstrahlen einen gleichen Bruchteil reflektiert, so daß das

zurückgeworfene Licht dieselbe Zusammensetzung hat wie das auffallende; im Sonnenlicht erscheint er weiß, in blauem Lichte blau, und von der rein gelben Natriumflamme beleuchtet erscheint er gelb.

Wenn ein dunkler Körper nicht alle auf ihn auffallenden Lichtstrahlen in demselben Verhältnis zurückwirft, so erscheint er uns farbig, z. B. rot, wenn er vorzugsweise die roten Strahlen (des Sonnenlichtes) reflektiert, die übrigen aber verschluckt oder absorbiert. Da jeder Stoff hiebei zwar eine Farbe besonders gut, aber auch noch alle andern Farben, wenn auch schwach reflektiert, so sind die Farben solcher Körper unrein.

Wird ein Stoff mit einfarbigem Licht beleuchtet, so kann er natürlich nur solches Licht reflektieren und erscheint demnach in dieser Farbe, und zwar stark leuchtend, wenn er diese Farbe reflektieren kann, dunkel, wenn er diese nicht oder nur schwach reflektieren kann.

Werden die Lichtstrahlen des Spektrums durch eine Sammellinse wieder vereinigt, so erhält man wieder Weiß. Schließt man bei diesem Versuch eine Farbe von der Vereinigung aus, indem man etwa durch einen Streifen Papier die grünen Strahlen abhält, so geben die übrigen vereinigt nicht weiß, sondern eine Farbe, die mit einer Spektralfarbe verglichen werden kann, in unserem Falle Rot. Dieses Rot ist keine reine Farbe, sondern eine Mischfarbe. Ebenso gibt Ausschließen von Orange Blau und Ausschließen von Gelb Violett und umgekehrt.

Da hiebei Rot aus Weiß entstanden ist durch Ausschließen von Grün, so muß Rot und Grün gemischt wieder weiß geben, ebenso Orange und Blau, Gelb und Violett, und zwar von großer Reinheit, wenn man die Farben passend wählt. Man nennt zwei solche Farben, welche mit einander gemischt Weiß geben, Komplementär- oder Ergänzungsfarben. Man zeigt dies, entweder indem man zwei Farben aus dem Spektrnm auswählt und vereinigt, oder durch den Farbenkreisel. Der Farbenkreisel ist ein schwerer scheibenförmiger Kreisel, der in rasche Rotation versetzt werden kann. Befestigt man auf ihn eine Papierscheibe, bei welcher ein Sektor rot, der andere grün bemalt ist, so mischen sich bei der Rotation im Auge die Farbeneindrücke und er erscheint weiß, je besser nach Intensität und Ton die Farben gewählt sind. Sind die Farben hiebei nicht komplementär, so erscheint eine Mischfarbe.

Wenn man vor einen großen weißen Schirm ein Stück farbigen Papiers hält, etwa grünes, dieses bei guter Beleuchtung lange und stark fixiert, dann das farbige Papier rasch vom Schirm entfernt und nun den Schirm anblickt, so sieht man auf dem Schirm ein farbiges Nachbild des entfernten Papieres und zwar in der

Komplementärfarbe, also rot. Denn durch das lange Betrachten des grünen Papieres wird unser Auge unempfindlich oder doch weniger empfindlich für Grün. Betrachtet man mit dem so geschwächten Auge den weißen Schirm, so empfindet das Auge noch alle Farben des Weiß, mit Ausnahme des Grün; die Vereinigung dieser Farben ohne Grün gibt aber die Komplementärfarbe Rot. Das Nachbild verschwindet bald, da das Auge sich wieder erholt. Da die rote Farbe des Nachbildes in Wirklichkeit nicht vorhanden ist, sondern von der besonderen Beschaffenheit (Ermüdung) unseres Auges bedingt ist, so nennt man sie eine subjektive Farbe. Der Versuch gelingt ebenso mit jeder anderen Farbe, sowie mit Hell und Dunkel.

Legt man eine kleine grüne Papierscheibe auf einen roten Schirm, fixiert das Grüne, und entfernt es, so erblickt man auf dem roten Schirm ein viel lebhafter rotes Nachbild der grünen Scheibe; auch dies erklärt man durch das komplementäre rote Nachbild des Grünen, das sich aus den nicht roten Farben des unreinen Rot zusammensetzt und sich mit dem schon vorhandenen Rot zu lebhafter Farbe zusammensetzt. Der Versuch gelingt ebenso mit jeder Farbe, die auf einem Hintergrund von komplementärer Farbe ruht. Da jede solche Farbe im stande ist, die benachbarte komplementäre Farbe durch das gleichfarbige subjektive Nachbild zu heben, so nennt man zwei komplementäre Farben auch Kontrastfarben. Orangefarbige oder goldgelbe Streifen auf blauem Grund erscheinen deshalb leuchtender und glänzender, rote Streifen auf grünem Grund treten hervor. Sind solche Streifen nicht in der Kontrastfarbe ausgeführt, so werden sie durch die Grundfarbe nicht gehoben, bleiben schwach, erscheinen sogar noch matter. So erscheint eine grüne Zeichnung auf gelbem Grunde oder eine blaue Zeichnung auf rotem Grunde matt und erdig. Denn das Grüne wird durch das blaue Nachbild des gelben Grundes zu einer matten Farbe abgeschwächt, ebenso die blaue Zeichnung durch das grüne Nachbild des roten Grundes.

235. Phosphorescenz.

Manche Stoffe erlangen, wenn sie einige Zeit dem Sonnenlichte ausgesetzt waren, die Fähigkeit, selbst zu leuchten; sie strahlen, wenn man sie ins Dunkle bringt, ein schwaches Licht aus. Dieses „Nachleuchten“ nennt man Phosphorescenz, da man das Licht wegen seines schwachen Schimmers vergleichen kann mit dem schwachen Lichte, das ein Stückchen Phosphor im Dunkeln abgibt. Der Art nach ist es jedoch davon ganz verschieden; denn das schwache Licht des Phosphors rührt von einer langsamen Verbrennung des Phosphors her, und dieselbe Ursache hat auch das Leuchten von faulem Holze und eine ähnliche Ursache hat wohl das Glühen

der bekannten Johanniswürmchen, Leuchtkäfer u. s. w. sowie das Meeresleuchten; derartiges Leuchten wird nur uneigentlich Phosphorescenz genannt.

Die Phosphorescenz ist ein bloßes Nachleuchten von Stoffen; welche der Sonne oder irgend einem Lichte ausgesetzt waren. Sie ist besonders stark bei den Sulfiden von Kalcium, Barium und Strontium, sowie beim Flußspat. Das Licht ist rötlich, bläulich, grünlich, je nach der chemischen Zusammensetzung des Stoffes, enthält aber außer diesen noch alle Spektralfarben.

Die Dauer des Nachleuchtens ist sehr verschieden; es dauert bei manchen Stoffen in abnehmender Stärke mehrere Stunden, bei manchen dagegen nur sehr kurze Zeit; ja man hat nachweisen können, daß fast alle Körper phosphorescieren, wenn auch bei manchen die Dauer des Nachleuchtens nur einige Hundertel einer Sekunde beträgt.

In neuester Zeit macht man von der Phosphorescenz eine nützliche Anwendung. Es ist nämlich gelungen, einen Stoff herzustellen, der sehr lange und stark phosphoresciert und wie eine gewöhnliche Malerfarbe zum Anstreichen von Gegenständen verwendet werden kann. Solche mit „Leuchtfarbe“ angestrichene Gegenstände werden, nachdem sie des Tags dem Sonnenlichte ausgesetzt waren, nachts leuchtend, so daß sie wenigstens leicht gesehen werden können. Man versieht so Feuerzeugschachteln, Leuchter. Glockenzüge, Schlagbäume bei der Eisenbahn und ähnliches mit Leuchtfarbe.

236. Fluorescenz.

Wenn man Sonnenlicht auf einen Flußspatkrystall fallen läßt, und denselben von der Seite betrachtet, so sieht man, daß die ersten Schichten des Krystalles, die von der Sonne getroffen werden, ein bläuliches Licht nach allen Seiten hin ausstrahlen.

Man nennt diese Erscheinung Fluorescenz. Ähnliche Erscheinungen nimmt man an manchen anderen Stoffen wahr, insbesondere auch an Flüssigkeiten, wie Chininlösung, Curcuma- und Chlorophyll-Lösung, auch an Petroleum. Betrachtet man Petroleum in einem Glase etwas schräg von der Seite, von welcher auch das Sonnenlicht (auch zerstreutes) auffällt, so erscheint es violett, während das durchgelassene Licht die gewöhnliche gelbe Farbe des Petroleums zeigt.

Diese Erscheinung, obwohl theoretisch sehr interessant, hat praktisch keine Verwendung.

237. Wärmestrahlen.

Bekanntlich kommen von der Sonne nicht bloß Lichtstrahlen zu uns, sondern auch Wärmestrahlen. Dieselben werden durch ein Prisma ebenso gebrochen und zerstreut wie die Lichtstrahlen.

Untersucht man das durch ein Prisma (aus Steinsalz) erhaltene Spektrum mit dem Thermometer, so zeigt sich die Wärme nicht gleichmäßig über das Spektrum verteilt. Am violetten Ende ist sehr wenig Wärme vorhanden, sie wächst, wenn man gegen das rote Ende hingeht; ja wenn man über das rote Ende hinausgeht, so zeigt sich noch eine beträchtliche Steigerung der Wärme, dann erst nimmt sie ab und verschwindet erst in einer Entfernung von Rot, die etwa ebensogroß ist als die ganze sichtbare Länge des Spektrums.

Man erkennt daraus, daß im Sonnenlichte Wärmestrahlen vorhanden sind, die eben so stark brechbar sind wie die Lichtstrahlen, man nennt sie die hellen Wärmestrahlen, daß aber auch noch eine beträchtliche Menge Wärmestrahlen vorhanden sind, die weniger brechbar sind als die roten Lichtstrahlen; man nennt sie dunkle Wärmestrahlen, weil sie vom Auge nicht mehr als Licht wahrgenommen werden, und nennt sie auch ultrarote Strahlen, weil sie jenseits des Rot im dunklen Teil des Spektrums liegen. Die „dunklen" Wärmestrahlen der Sonne sind etwa doppelt so viel, als die „hellen".

Untersucht man irdische Wärmequellen, so findet man, je niedriger deren Temperatur ist, desto weniger brechbar sind ihre Wärmestrahlen und bei wachsender Temperatur kommen immer mehr Strahlen von höherer Brechbarkeit dazu. Dunkle Wärmequellen, wie etwa die Wand eines Blechgefäßes, in dem sich heißes Wasser befindet, oder eine Ofenplatte, die noch nicht glüht, senden nur dunkle Wärmestrahlen aus; erst nach Beginn der Rotglut, ca. 500^0, treten zu den dunklen auch noch helle Wärmestrahlen zunächst im Hellrot, und je mehr der Körper glühend wird, desto mehr verbreiten sich die hellen Wärmestrahlen vom Rot aus über das ganze Spektrum. Erst bei 2000^0 treten auch die violetten Strahlen auf, so daß erst nach 2000^0 reines Weiß eintritt. Doch sind stets die hellen Wärmestrahlen viel weniger als die dunklen. So sind z. B. bei einer Öl- oder Gasflamme die hellen Wärmestrahlen nur 1 resp. $2^0/_0$ der Gesamtstrahlung, und von der Wärme, die das elektrische Licht ausstrahlt, sind nur $10^0/_0$ helle, also noch $90^0/_0$ dunkle Strahlen. Da im Sonnenlichte ca. $33^0/_0$ helle Strahlen vorhanden sind, so möchte man schließen, daß die Hitze (Temperatur) der Sonne viel höher sei als die des elektrischen Lichtbogens, denn je heißer die Quelle, um so größer ist der Prozentsatz der hellen Strahlen. Allein die Sonnenstrahlen kommen nicht unverändert zu uns, sondern beim Durchgange durch die Atmosphäre werden vorzugsweise die dunklen Wärmestrahlen absorbiert. Das Licht leuchtender Insekten besteht fast nur aus hellen Strahlen im Gelb.

238. Durchgang der Wärmestrahlen.

Sehr eigentümlich verhalten sich die Stoffe beim Durchgange der Wärmestrahlen. Farblose Stoffe lassen die hellen Wärmestrahlen ebensogut durch wie die Lichtstrahlen. Wesentlich anders verhalten sie sich aber gegenüber den dunklen Wärmestrahlen. Nur Steinsalz läßt auch nahezu alle dunklen Wärmestrahlen durch: alle anderen absorbieren beträchtliche Mengen der Wärmestrahlen und zwar anfangend von den am wenigsten brechbaren Strahlen; sie verkürzen demnach das Wärmespektrum. Glas läßt z. B. von den dunklen Wärmestrahlen, die eine Flamme oder ein weißglühender Platindraht aussendet, nur etwa ein Viertel durch, von den dunklen Wärmestrahlen, die ein dunkler Körper von 100° ausstrahlt, aber gar keine. Noch weniger dunkle Wärmestrahlen läßt Alaun, Wasser, Eis u. s. w. durch.

Eine Lösung von Jod in Schwefelkohlenstoff, die für Licht vollkommen undurchsichtig ist, läßt doch die dunklen Wärmestrahlen vollkommen durch, ist für diese also gleichsam durchsichtig. Vereinigt man diese dunklen Wärmestrahlen durch eine Steinsalzlinse, so kann ein Platinblech sogar glühend gemacht werden (Tyndall).

Von den farblosen, einfachen Gasen lassen Sauerstoff, Wasserstoff und Stickstoff nicht bloß alle hellen, sondern auch fast alle dunklen Wärmestrahlen durch. Zusammengesetzte Gase absorbieren jedoch viel mehr von den dunklen Wärmestrahlen; z. B. Kohlensäure absorbiert 90 mal mehr als die athmosphärische (trockene) Luft, Sumpfgas 403 mal, ölbildendes Gas 970 mal mehr. Die Absorption in einem Gase ist im allgemeinen um so bedeutender, je komplizierter seine Zusammensetzung ist; Wasserdampf absorbiert 60 mal mehr Wärmestrahlen als eine gleiche Masse von Sauerstoff- und Wasserstoffgas; Ammoniak 150 mal mehr als seine Elemente.

Sehr viel dunkle Wärme absorbiert auch der in der Luft enthaltene Wasserdampf, obwohl dessen Dichte und Spannkraft meist klein ist. Kommen deshalb die Sonnenstrahlen zu uns, so wird ein großer Teil der dunklen Wärmestrahlen derselben durch die Luft und besonders durch den darin enthaltenen Wasserstoff absorbiert und so direkt zur Erwärmung der Luft verwendet. Und wenn umgekehrt die erwärmten Gegenstände auf der Erde Wärme ausstrahlen, die ja nur dunkle Wärme ist, so wird diese zum größten Teil von der Luftfeuchtigkeit absorbiert, und zwar um so stärker, je feuchter die Luft ist.

239. Die chemischen Strahlen.

Die Sonnenstrahlen können auch eine chemische Wirkung hervorbringen; z. B. beim Photographieren wird durch die Licht-

strahlen das Jodsilber zersetzt. Läßt man das durch ein Prisma erhaltene Spektrum des Sonnenlichtes auf eine photographische Platte fallen, so zeigt sich, daß die Stärke der chemischen Wirkung nicht gerade der Helligkeit der Farben des Spektrums proportional ist, sondern die chemische Wirkung ist im Rot verschwindend klein, ist nur wenig merklich, doch wachsend von Gelb bis Blau, wächst sehr stark im Dunkelblau und ist im Violett am stärksten. Aber auch noch jenseits des sichtbaren Violett ist noch chemische Wirkung vorhanden in abnehmender Stärke und verschwindet erst in einer Entfernung vom Violett, die ungefähr der Breite des sichtbaren Spektrums gleich ist.

Man schließt daraus, daß entweder die chemische Wirkung von Strahlen hervorgebracht wird, die von den Lichtstrahlen verschieden sind, oder, daß beide Wirkungen, Licht und chemische Wirkung, von denselben Strahlen hervorgebracht werden, daß aber diese Strahlen je nach ihrer Brechbarkeit in verschiedenem Grade solche Wirkungen hervorbringen. Es bringen also die Strahlen, die wir als rot, gelb, grün wahrnehmen, lebhafte Farbenempfindung in unserem Auge, aber nur schwache chemische Wirkung hervor, während blaue und besonders violette Strahlen nur schwachen Lichteindruck, aber starke chemische Wirkung ausüben; jenseits des Violett gibt es sogar noch eine Menge von Lichtstrahlen, die ultravioletten,

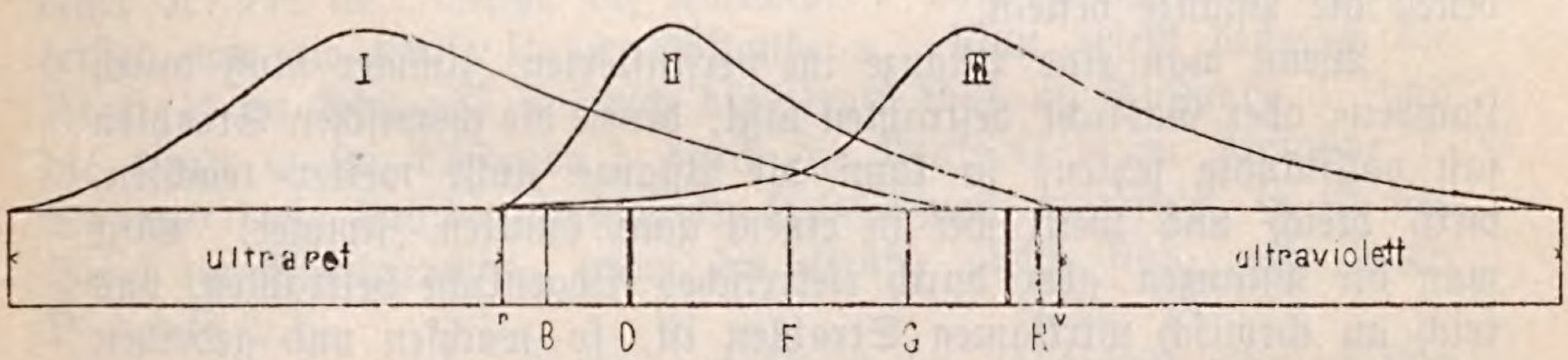


Fig. 295.

die gar keine Lichtempfindung und doch noch chemische Wirkung hervorbringen. Man nennt alle diejenigen Strahlen, welche eine chemische Wirkung hervorbringen, chemische Strahlen.

Man hat demnach eine Verlängerung des sichtbaren Spektrums durch die chemischen Strahlen über das violette Ende hinaus, ebenso wie wir eine Verlängerung desselben durch die dunklen Wärmestrahlen über das rote Ende hinaus gefunden haben. In Fig. 295 ist in der Kurve I die Intensivität der Wärmestrahlen, in II die der Lichtstrahlen, in III die der chemischen Strahlen gezeichnet. Auch im ultraroten Wärmespektrum hat man Lücken nachgewiesen, welche Fraunhoferschen Linien analog sind; ebenso im ultravioletten, chemischen Spektrum.

Wie irdische Wärmequellen reich sind an dunklen Wärmestrahlen und arm an hellen Wärmestrahlen, also vorzugsweise die

Strahlen von geringer Brechbarkeit besitzen, so findet man, daß sie auch arm sind an den chemisch wirksamen Strahlen höherer Brechbarkeit. Je intensiver die Hitze des leuchtenden Körpers, desto größer ist auch die Menge der chemisch wirksamen Strahlen, und es besitzt z. B. das elektrische Bogenlicht deren eine große Menge. Es ist deshalb nicht oder nicht gut möglich, bei Lampen- oder Gaslicht zu photographieren, während elektrisches Bogenlicht sich recht gut dazu eignet und schon vielfach verwendet wird.

Die bisher besprochenen Wirkungen beziehen sich jedoch nur auf die Zersetzung von Chlorsilber. Bei anderen chemischen Wirkungen haben andere Strahlen größere Energie; bei grünem Chlorophyll wirken die roten Strahlen am meisten. Im allgemeinen wirken gerade die Strahlen auf einen Stoff am stärksten, welche von dem Stoffe absorbiert werden.

Unentbehrlich ist die chemische Wirkung der Sonnenstrahlen für das Wachstum der Pflanzen. Die Pflanzen nehmen nämlich aus der Luft (die Wasserpflanzen aus dem Wasser) Kohlensäure auf; in den grünen Pflanzenteilen (Blättern, Nadeln, grünen Stengeln) wird durch die chemische Wirkung der Sonnenstrahlen die Kohlensäure zerlegt, Sauerstoff ausgeschieden, und unter Hinzunahme von Wasserstoff aus Wasser, das auch zerlegt wird, werden dann die verschiedenen, an Kohle und Wasserstoff reichen Stoffe gebildet, aus denen die Pflanze besteht.

Wenn man eine Pflanze im verfinsterten Zimmer bloß durch Lampen- oder Gaslicht bestrahlen läßt, denen die chemischen Strahlen fast vollständig fehlen, so kann die Pflanze nicht weiter wachsen, wird bleich und welkt wie in einem ganz dunklen Zimmer. Läßt man die Pflanzen aber durch elektrisches Bogenlicht bestrahlen, das reich an chemisch wirksamen Strahlen ist, so wachsen und gedeihen sie wie an der Sonne.

Ob es dreierlei Strahlen verschiedener Art, Wärme-, Licht- und chemische Strahlen gebe, oder ob es nur eine Art von Strahlen gebe, welche je nach ihrer Brechbarkeit in verschiedener Art wirken, ist noch nicht ausgemacht.

Elfter Abschnitt.

Mechanik.

240. Der Hebel.

Das Gesetz des einfachen Hebels heißt: **Der Hebel ist im Gleichgewichte, wenn die Kräfte sich verhalten wie umgekehrt die Längen der Hebelarme**, also wenn:

$$P : Q = b : a.$$

Man bildet hieraus nach arithmetischen Sätzen $P \cdot a = Q \cdot b$, und sagt: Der Hebel ist im Gleichgewichte, wenn das Produkt aus der Kraft mal ihrem Hebelarme gleich ist dem Produkte aus der Last mal ihrem Hebelarme.

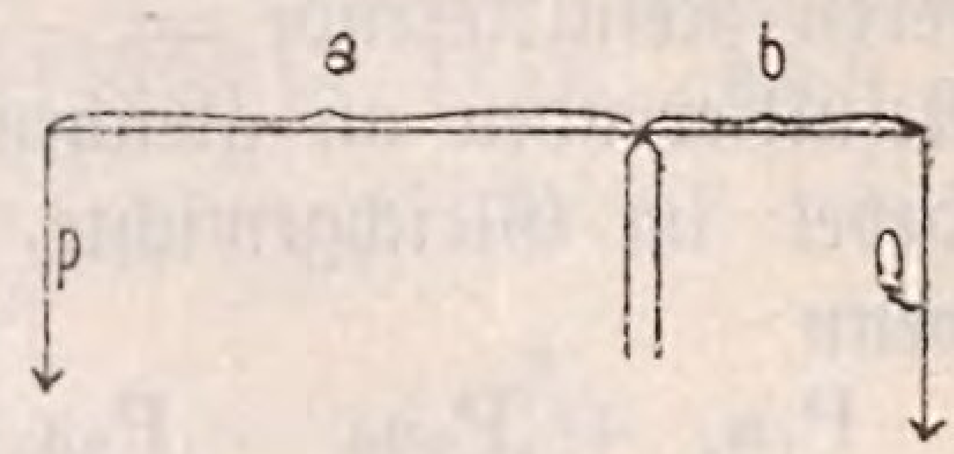


Fig. 296.

Ein solches Produkt aus einer Kraft und ihrem zugehörigen Hebelarme nennt man das statistische Moment oder Drehmoment der Kraft. Das Moment oder der Antrieb zur Bewegung, den eine Kraft hervorbringt, wenn sie an einem Hebelarme angreift, ist nämlich nicht bloß von der Größe der Kraft, sondern auch von der Länge des Hebelarmes abhängig, und ist, wie wir aus den einfachsten Versuchen am Hebel erkannt haben, beiden proportional; deshalb kann das Moment einer Kraft ausgedrückt werden durch das Produkt aus Kraft und Hebelarm; da dies Produkt dann alles enthält, was die Kraft zur Drehung des Hebels beiträgt, so nennt man dies Produkt das Moment, das statische Moment, das Drehmoment der Kraft.

Man kann also das Hebelgesetz auch so aussprechen: **Ein Hebel ist im Gleichgewichte, wenn die Momente beider Kräfte einander gleich sind und nach verschiedenen Richtungen wirken.**

Das Moment $P \cdot a$ einer Kraft P gibt zugleich die Größe einer Kraft an, welche im Abstande 1 vom Drehpunkte dasselbe leistet, wie die Kraft P im Abstande a. Man ersetzt demnach die Kraft P im Abstande a durch die Kraft $P \cdot a$ im Abstande 1, und die Kraft Q im Abstande b durch die Kraft $Q \cdot b$ im Abstande 1. Da nun diese Kräfte an gleichen Hebelarmen angreifen, so ist der Hebel im Gleichgewicht, wenn die Kräfte gleich sind, also wenn $P \cdot a = Q \cdot b$.

Wirken mehrere Kräfte auf den Hebel, so bringt jede an ihm ein Drehmoment hervor, dessen Größe gleich ist dem Produkte aus der Kraft mal ihrem Hebelarme. Denkt man sich die Kräfte wie-

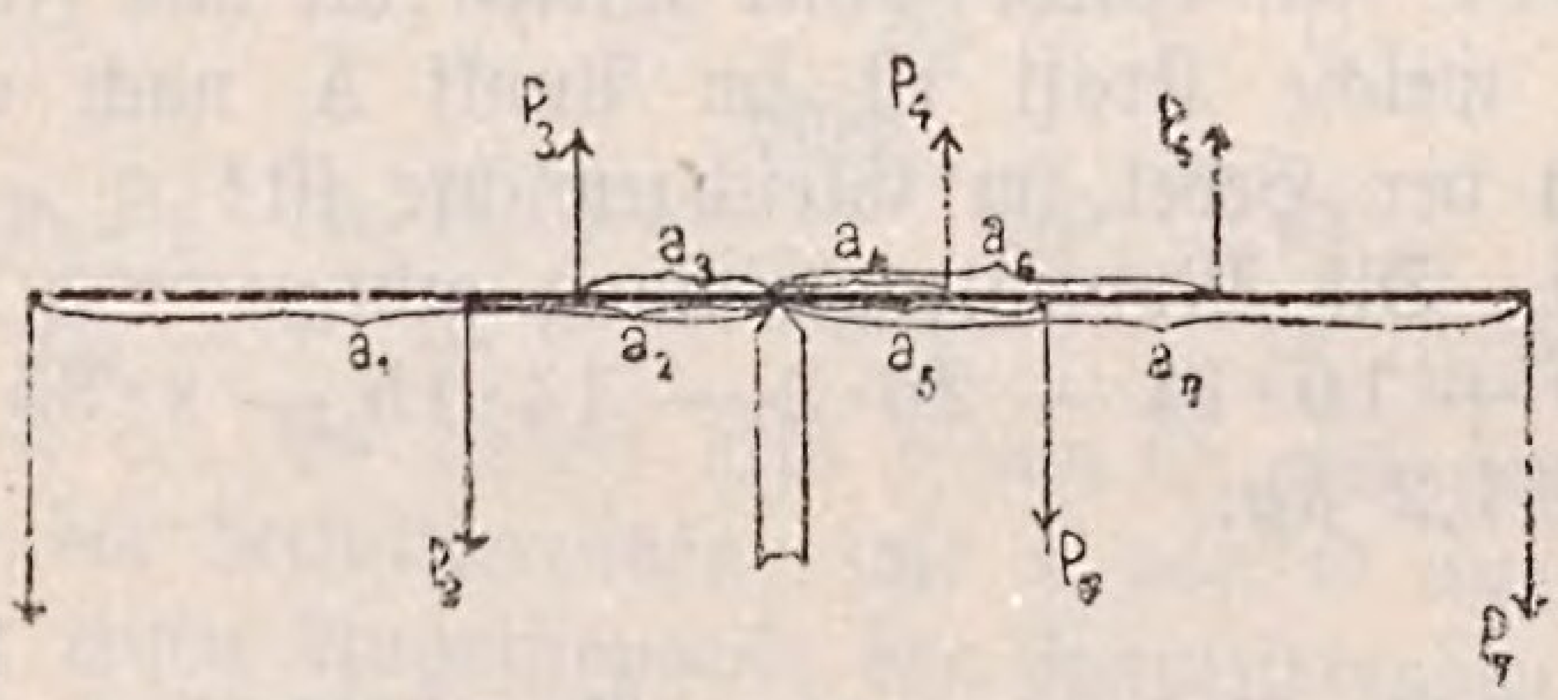


Fig. 297.

der ersetzt durch Kräfte, die je im Abstande 1 wirken und je dasselbe Moment haben, so hat man bei der in Fig. 297 angegebenen Anordnung links vom Drehpunkte im Abstand 1 die Kräfte P_1a_1, P_2a_2, P_3a_3 anzubringen; ihre Resultierende ist, da P_3a_3 nach der

entgegengesetzten Richtung wirkt $= P_1a_1 + P_2a_2 - P_3a_3$; ebenso hat man rechts vom Drehpunkte im Abstand 1 Kräfte anzubringen, deren Resultierende $= - P_4a_4 + P_5a_5 - P_6a_6 + P_7a_7$. Da beide Resultierenden an gleichen Hebelarmen (= 1) angreifen, so ist der Hebel im Gleichgewichte, wenn sie selbst einander gleich sind, also wenn

$$P_1a_1 + P_2a_2 - P_3a_3 = - P_4a_4 + P_5a_5 - P_6a_6 + P_7a_7.$$

Ordnet man diese Momente so, daß auf jeder Seite nur positive Glieder stehen, also:

$$a_1P_1 + a_2P_2 + a_4P_4 + a_6P_6 = a_3P_3 + a_5P_5 + a_7P_7,$$

so kann man das Gesetz so aussprechen: **Der Hebel ist im Gleichgewichte, wenn die Summe der Momente der Kräfte, welche den Hebel nach der einen Richtung zu drehen suchen, gleich ist der Summe der Momente der Kräfte, welche den Hebel nach der andern Richtung zu drehen suchen.**

Wenn man alle Momente auf eine Gleichungsseite schafft, also:

$$a_1P_1 + a_2P_2 - a_3P_3 + a_4P_4 - a_5P_5 + a_6P_6 - a_7P_7 = 0,$$

so kann man das Gesetz auch so aussprechen: **Der Hebel ist im Gleichgewichte, wenn die algebraische Summe aller Momente = 0 ist;** dabei sind die Momente mit dem + oder − Zeichen zu nehmen, je nachdem sie den Hebel nach der einen oder nach der anderen Richtung zu drehen suchen.

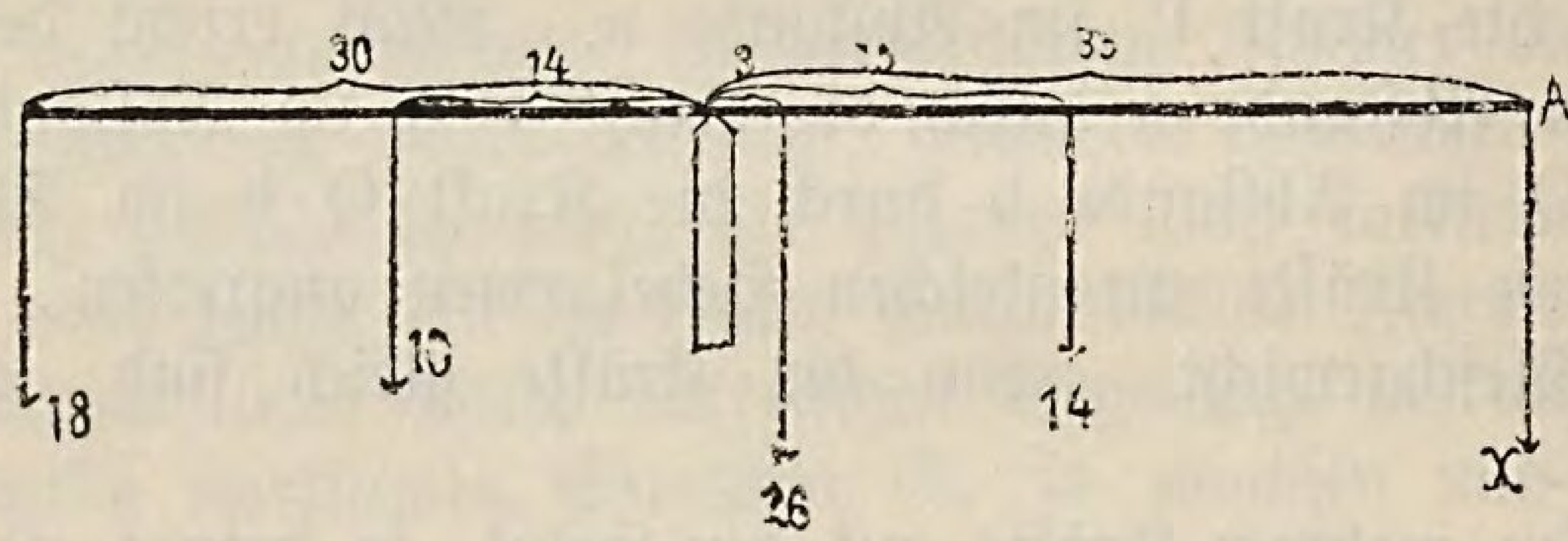


Fig. 298.

Beispiel: An einem Hebel wirken die aus Fig. 298 ersichtlichen Kräfte; welche Kraft ist im Punkt A nach abwärts anzubringen, damit der Hebel im Gleichgewichte ist?

Antwort: Die Momentengleichung gibt:

$$18 \cdot 30 + 10 \cdot 14 - 26 \cdot 3 - 14 \cdot 15 - x \cdot 35 = 0;$$

hieraus $x = 11{,}2$ *kg*.

241. Resultante von Parallelkräften.

Parallelkräfte, welche an einer starren Stange angreifen, haben eine Resultierende, welche den Parallelkräften parallel, und gleich ihrer algebraischen Summe ist. Hat die Stange irgendwo einen Stütz- oder Dreh-

punkt und soll die Resultierende die vorhandenen Kräfte auch in bezug auf ihre Drehwirkung ersetzen können, so muß der Angriffspunkt der Resultierenden so gewählt sein, daß das

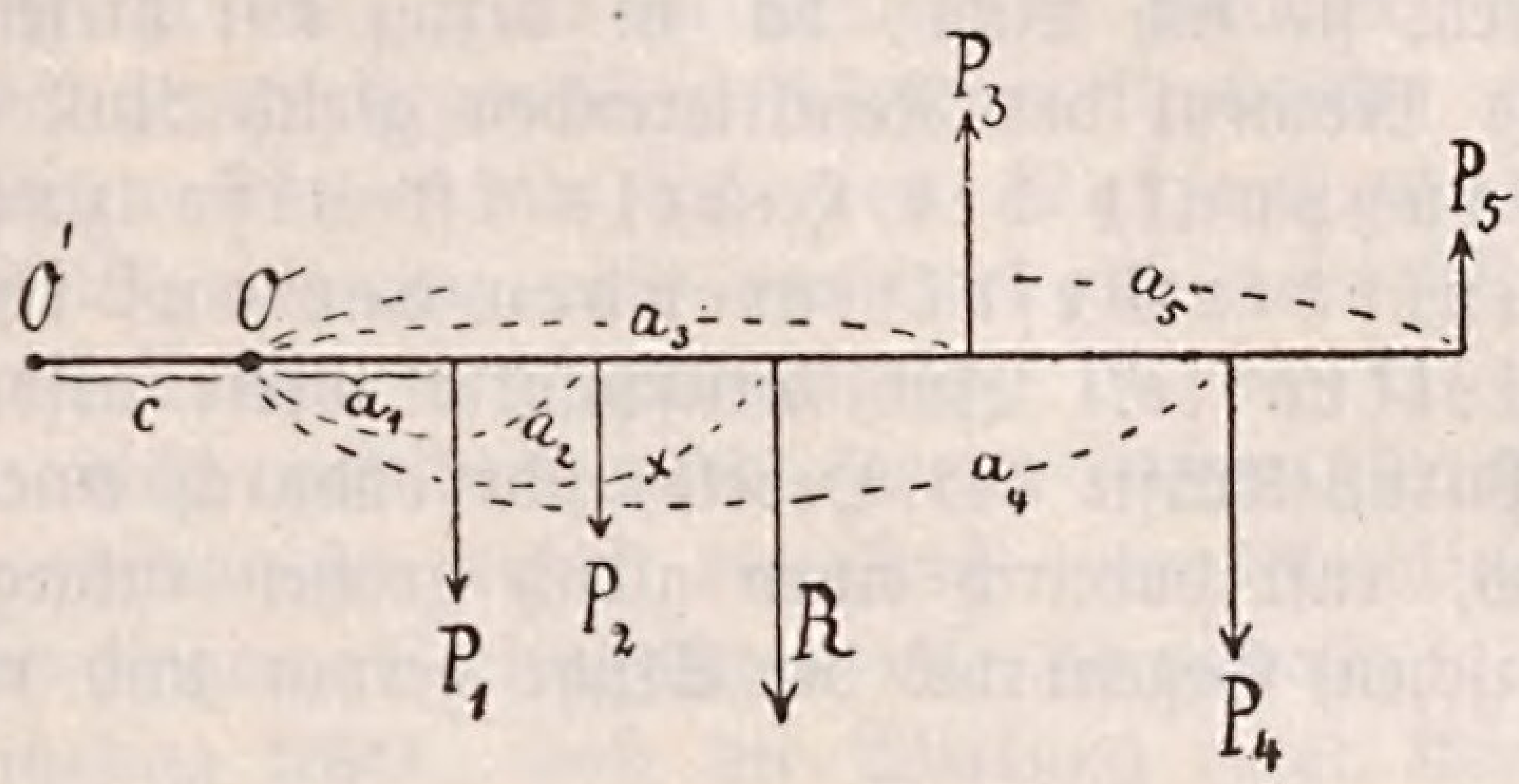


Fig. 299.

Moment der Resultierenden gleich ist der algebraischen Summe der Momente der vorhandenen Kräfte, wobei jedes Moment zu nehmen ist in bezug auf den gegebenen Drehpunkt.

Sind also P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 die gegebenen Kräfte, von denen P_3 und P_5 nach der entgegengesetzten Richtung wirken, so ist

$$R = P_1 + P_2 - P_3 + P_4 - P_5.$$

Ist nun O der Drehpunkt und bezeichnet man den Abstand von O bis zum Angriffspunkt der Resultierenden R mit x, so muß:
$R \cdot x = a_1 P_1 + a_2 P_2 - a_3 P_3 + a_4 P_4 - a_5 P_5$ sein, also ist

$$x = \frac{a_1 P_1 + a_2 P_2 - a_3 P_3 + a_4 P_4 - a_5 P_5}{P_1 + P_2 - P_3 + P_4 - P_5} = \frac{\Sigma a_n P_n}{\Sigma P_n}.$$

Auf diese Art findet man den Angriffspunkt der Resultierenden.

Man findet stets denselben Angriffspunkt der Resultierenden, welchen Punkt man auch als Drehpunkt wählen mag. Denn wählt man O′ als Drehpunkt, und bezeichnet O′R mit y, und OO′ mit c, so ist

$$y = \frac{(a_1 + c) P_1 + (a_2 + c) P_2 - (a_3 + c) P_3 + \ldots\ldots}{P_1 + P_2 - P_3 + \ldots\ldots}$$

oder

$$y = \frac{a_1 P_1 + a_2 P_2 - a_3 P_3 + \ldots\ldots}{P_1 + P_2 - P_3 + \ldots\ldots} + \frac{cP_1 + cP_2 - cP_3 + \ldots\ldots}{P_1 + P_2 - P_3};$$

also $y = x + c$. Es liefert also y von O′ aus gemessen denselben Angriffspunkt der Resultierenden, wie x von O aus gemessen. Es gibt also nur einen Angriffspunkt der Resultierenden.

Daraus folgt auch: Wenn in bezug auf einen bestimmten Punkt O als Drehpunkt der Angriffspunkt der Resultierenden richtig bestimmt ist, so ist auch in bezug auf jeden andern Punkt als Drehpunkt das Moment der Resultierenden gleich der algebraischen Summe der Momente der einzelnen Kräfte. Die Resultierende kann also die vorhandenen Kräfte vollständig ersetzen.

Den Angriffspunkt der Resultierenden nennt man auch den Mittelpunkt oder Schwerpunkt des Systems der parallelen Kräfte.

Wird die Stange gerade im Angriffspunkt der Resultierenden gestützt, so dreht sie sich nicht, da in bezug auf diesen Punkt als Drehpunkt das Moment der Resultierenden gleich Null ist.

Der Stützpunkt des Hebels ist also zugleich der Angriffspunkt der Resultierenden der auf ihn wirkenden Parallelkräfte. Im Stützpunkte wirkt also die Resultierende der Parallelkräfte des Hebels, übt dadurch einen Druck auf die Stütze aus, ruft dadurch einen gleich großen entgegengesetzt gerichteten (elastischen) Gegendruck der Stütze hervor und wird dadurch aufgehoben.

Bringt man im Stützpunkte die in der Stütze wirkende, der Resultierenden gleiche und entgegengesetzte Kraft auch als Kraft an und betrachtet sie als zu den Parallelkräften gehörig, so kann man die Stütze als solche beseitigt denken; der Hebel schwebt frei, geschützt gegen das Fallen, denn es ist jetzt die Resultierende sämtlicher an ihm wirkenden Kräfte gleich Null, und geschützt gegen das Drehen, denn die algebraische Summe der Momente sämtlicher Kräfte ist gleich Null in bezug auf den Stützpunkt, also auch, da die Resultierende selbst gleich Null ist, in bezug auf jeden andern Punkt als Drehpunkt. Dieses System von Kräften ist in sich selbst im Gleichgewicht; einen Hebel, an welchem ein solches System von Kräften angreift, kann man einen freien Hebel nennen.

Also: Jedes System von Parallelkräften, das an einer starren Stange angreift, und bei welchem die algebraische Summe der Kräfte nicht von selbst gleich Null ist, hat eine Resultierende und kann durch eine der Resultierenden gleiche und entgegengesetzte Kraft ins Gleichgewicht gebracht werden.

Ist bei einem System von Parallelkräften die algebraische Summe sämtlicher Kräfte von selbst gleich Null, so ist die Resultierende gleich Null. Das System hat keine Resultierende. Ist hiebei noch dazu die algebraische Summe der Momente sämtlicher Kräfte in bezug auf einen bestimmten Punkt von selbst gleich Null, so ist sie in bezug auf jeden Punkt gleich Null, das System dreht sich überhaupt nicht, es ist in sich selbst im Gleichgewicht.

Ist hiebei die algebraische Summe der Momente in bezug auf irgend einen Punkt nicht von selbst gleich Null, so ist sie auch in bezug auf jeden andern Punkt nicht gleich Null, d. h. wenn dies System sich in bezug auf irgend einen Punkt zu drehen bestrebt, so sucht es sich auch zu drehen, wenn man irgend einen anderen Punkt als Drehpunkt wählt; das System kann also durch Anbringung von einer Kraft allein nicht ins Gleichgewicht gebracht werden.

242. Starres System.

Wenn auf einen festen Körper eine Kraft wirkt, so bewegt er sich stets so, daß all seine Teile in Bewegung kommen. Der Grund dafür liegt in der gegenseitigen Anziehung der Moleküle. Man nennt deshalb einen festen Körper ein starres System materieller Punkte. Diese Bezeichnung wird erweitert auf einen festen Körper, der aus mehreren Teilen so zusammengesetzt ist, daß die gegenseitige Lage der Teile nicht geändert wird, wenn äußere Kräfte ihn angreifen. Man abstrahiert dabei von den unausbleiblichen kleinen Änderungen, Biegungen, Verkürzungen und ähnlichem.

Die Erfahrung lehrt, daß die Wirkung einer Kraft auf ein starres System sich nicht ändert, wenn man den Angriffspunkt der Kraft in der Richtung der Kraft an einen andern Punkt des Systems verlegt.

Wir betrachten ein ebenes starres System und lassen an ihm beliebige Kräfte wirken, deren Richtungen alle in der Ebene des Systems selbst liegen. Wir suchen die Resultierende.

Wir ziehen in der Ebene eine beliebige Gerade, verlegen den Angriffspunkt jeder Kraft in diese Gerade, und haben somit eine starre Gerade, an welcher an verschiedenen Punkten Kräfte P_1, P_2, P_3 . . . . . . unter verschiedenen Winkeln α_1, α_2, α_3 . . . . . . wirken. Dabei seien alle Winkel in demselben Sinne gemessen, etwa nach rechts und abwärts bis 180°, und nach rechts und aufwärts auch bis 180°, letztere jedoch als negativ betrachtet.

Wir zerlegen jede Kraft in zwei Komponenten, von denen die eine (x) in der Richtung der Geraden, die andere (y) senkrecht dazu wirkt. Dann ist

$$x_1 = P_1 \cos \alpha_1;\ x_2 = P_2 \cos \alpha_2, \ldots\ldots x_n = P_n \cos \alpha_n$$
$$y_1 = P_1 \sin \alpha_1;\ y_2 = P_2 \sin \alpha_2; \ldots\ldots y_n = P_n \sin \alpha_n.$$

Man vereinigt die x_1, x_2 . . . . . . zu einer Resultierenden

$$X = x_1 + x_2 + x_3 + \ldots\ldots x_n; \text{ ebenso}$$
$$Y = y_1 + y_2 + y_3 + \ldots\ldots y_n.$$

Man bestimmt ferner den Angriffspunkt O von Y als den Angriffspunkt der Resultierenden von Parallelkräften, so wirken in O die zwei Kräfte x und y. Man bildet die Resultierende $R = \sqrt{X^2 + Y^2}$ und die Richtung derselben $\tang \omega = \frac{Y}{X}$. Man weiß dann, daß an einem beliebigen Punkt dieser Richtung die Resultierende R eben in dieser Richtung wirkt.

Ist das starre ebene System dabei in einem Punkte C drehbar befestigt, so findet man das Moment der Resultierenden in bezug auf diesen Drehpunkt, indem man von C auf der Richtung von R eine Senkrechte fällt, und diesen Abstand als Hebelarm mit R multipliziert.

Soll bloß das Moment der Resultierenden in bezug auf einen gegebenen Drehpunkt C gefunden werden, so fällt man von C auf jede Kraftrichtung eine Senkrechte, a_1, a_2, a_3 . . . . .; dann ist das Moment der Resultierenden gleich der algebraischen Summe der Momente der einzelnen Kräfte. $M = P_1 a_1 + P_2 a_2 + P_3 a_3 + \ldots\ldots$

Da das Starrsein eines Systems nur durch die gegenseitige Anziehung der Moleküle bedingt ist, so hört ein System auf, starr zu sein, wenn die Kraft zu heftig auf den Körper wirkt, wie bei einem starken Stoß, Ruck und Schlag. Es werden dann die getroffenen Teile aus dem Verband des starren Systems losgerissen. Man sagt, eine dem festen Körper mitzuteilende Bewegung bedarf hiezu einer gewissen Zeit. Beispiele: Durch Druck kann man ein Brett umwerfen, eine abgeschossene Flintenkugel schlägt ein Loch durch. Eine Münze auf einem Kartenblatt folgt einer langsamen Bewegung desselben, einer raschen nicht. Ein an zwei schwachen Fäden horizontal aufgehängter Stab wird durch raschen Schlag zerbrochen, ohne daß die Fäden reißen. Langsame aber wuchtige Schläge treiben den Pfahl in den Boden; heftige Hammerschläge zersplittern ihn oben.

243. Bestimmung des Schwerpunktes.

Schwerpunkt ist der Angriffspunkt der Resultierenden all der kleinen Schwerkräfte, die auf die einzelnen Teilchen des Körpers wirken.

Schwerpunkt einer geraden Linie.

Eine physikalische Linie ist ein der Länge nach ausgedehnter Körper, der so dünn ist, daß man von seiner Breite und Dicke absehen kann (Molekülreihe). Ist eine starre gerade Linie überall gleich schwer, so liegt der Schwerpunkt in der Mitte; denn von diesem Punkte aus nach rechts und links liegen in je gleichen Entfernungen gleich schwere Massenteilchen; der Angriffspunkt der Resultierenden jedes Paares derselben geht also durch die Mitte ihrer Entfernung. Ein steifer, dünner, gerader Draht, der überall gleich dick ist und aus derselben Masse besteht, bietet annähernd ein Beispiel dafür.

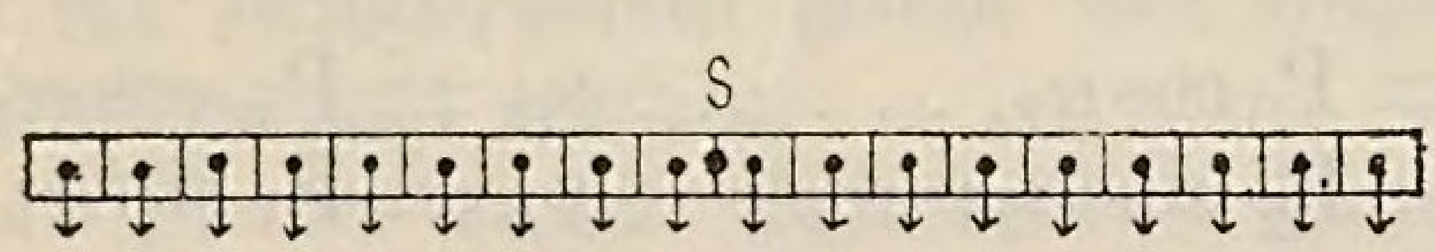


Fig. 300.

Schwerpunkt des Rechtecks.

Eine physikalische Fläche ist ein der Länge und Breite nach ausgedehnter Körper, der so dünn ist, daß man von seiner Dicke absehen kann (Molekülschichte).

Denkt man sich das Rechteck parallel einer Seite in ungemein viele, sehr schmale und gleich schmale Streifen zerschnitten, so daß

jeder Streifen etwa bloß eine Molekülreihe enthält, so liegt der Schwerpunkt jedes solchen Streifens in seiner Mitte; diese Schwerpunkte erfüllen als geometrischen Ort eine Linie, welche, wie aus geometrischen Gründen leicht ersichtlich ist, die gerade Verbindungslinie der Mitten der zwei Gegenseiten ist; auch liegen die Schwerpunkte auf dieser Linie gleich weit von einander entfernt, weil die Streifen gleich breit sind. Denkt man sich nun das Gewicht jedes Streifens in seinem Schwerpunkte angebracht, so sind die Gewichte dieser Schwerpunkte gleich groß, weil die Streifen gleich lang und breit sind und aus gleicher Masse bestehen. Wir haben also auf der Schwerlinie in Punkten von gleichen Entfernungen gleich große Kräfte, ebenso wie bei einer Molekülreihe; die Resultierende derselben geht also durch die Mitte der Schwerlinie, und dort liegt der Schwerpunkt des Rechtecks. Aus geometrischen Gründen ist ersichtlich, daß dieser Schwerpunkt im Schnittpunkte der Diagonalen liegt und so am leichtesten gefunden werden kann. Ähnliche Ableitung und gleiches Resultat gilt über den Schwerpunkt des Parallelogramms, Rhombus und Quadrates.

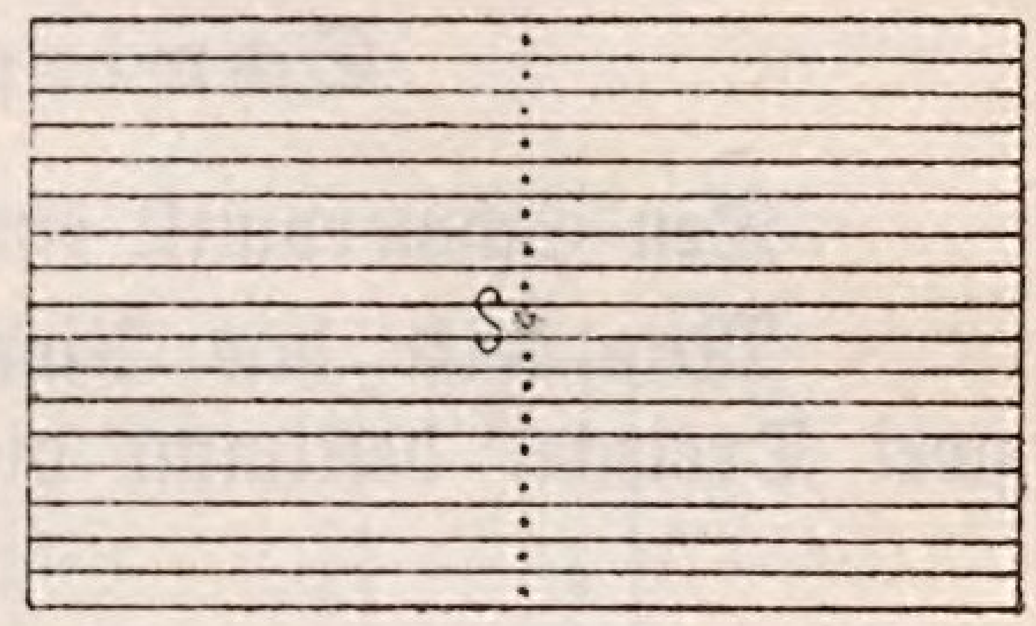


Fig. 301.

Schwerpunkt des Dreiecks.

Man zerlegt das Dreieck, ähnlich wie das Rechteck, in Streifen, die einer Seite parallel sind; die Schwerpunkte derselben liegen in ihren Mitten und erfüllen, wie aus geometrischen Gründen leicht ersichtlich ist, eine gerade Linie, welche die Mitte der Dreiecksseite mit der Spitze verbindet, also die Seitenhalbierungslinie. Denkt man sich nun wieder das Gewicht jedes einzelnen Streifens in seinem Schwerpunkte vereinigt, so hat man auf der Schwerlinie auch wieder Punkte von gleicher Entfernung; aber in denselben wirken nicht gleiche Kräfte, weil die Streifen nicht gleich lang sind, sondern gegen die Spitze zu immer kürzer werden. Man kann also nicht sagen, der Angriffspunkt der Resultierenden liege in der Mitte dieser Linie, sondern man kann nur erkennen, daß er auf dieser Linie liegt.

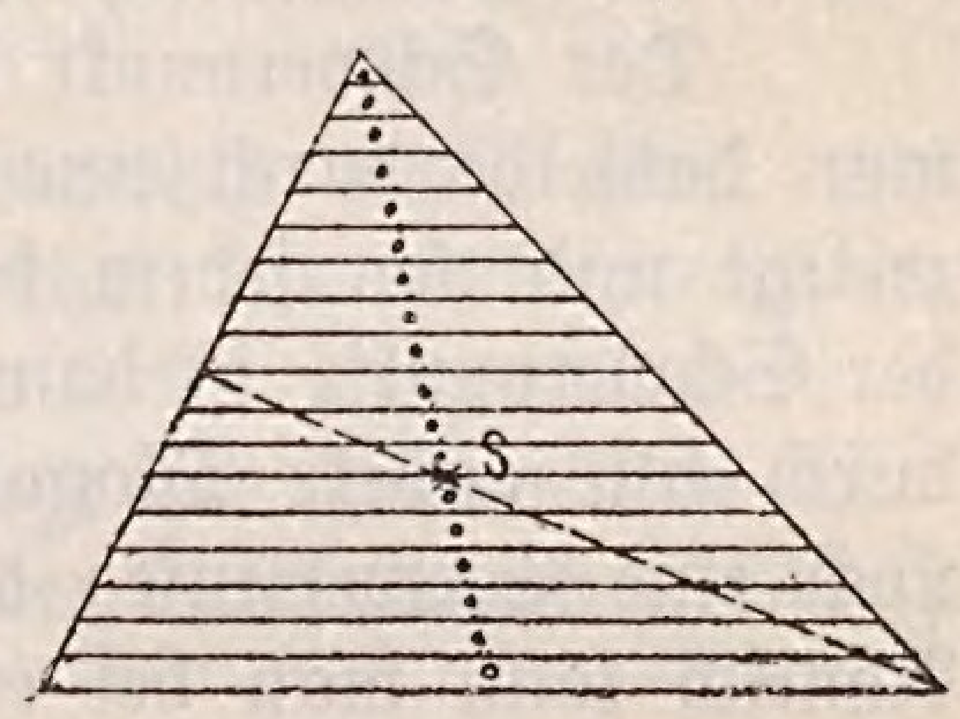


Fig. 302.

Denkt man sich aber das Dreieck parallel einer anderen Seite in Streifen zerlegt und die nämliche Abteilung gemacht, so findet man, daß auch diese zweite Seitenhalbierungslinie eine Schwerlinie ist, auf welcher der Schwerpunkt liegen muß. Man schließt deshalb,

daß der Schwerpunkt im Schnittpunkt beider Schwerlinien liegt. Der Schwerpunkt des Dreiecks liegt also im Schnittpunkte der Seitenhalbierungslinien, von welchem geometrisch bekannt ist, daß er im ersten Drittel jeder Seitenhalbierungslinie liegt.

Schwerpunkt von Vielecken.

Den Schwerpunkt eines Vierecks findet man auf folgende Weise:

Man teilt das Viereck ABCD durch die Diagonale AC in zwei Dreiecke, bestimmt die Schwerpunkte s und s′ desselben, denkt sich das Gewicht jedes Dreiecks in seinem Schwerpunkte vereinigt und schließt, daß der Angriffspunkt der Resultierenden beider Gewichte, also der Schwerpunkt, auf der Geraden ss′ selbst liegen muß; ss′ ist also Schwerlinie des Vierecks. Man teilt das Viereck durch die Diagonale BD in zwei andere Dreiecke, bestimmt deren Schwerpunkte s_1 und s_1' und schließt, daß auch die Gerade $s_1 s_1'$ eine Schwerlinie des Vierecks ist; daraus folgt dann, daß der Schwerpunkt S im Schnittpunkte von ss′ und $s_1 s_1'$ liegt. (Welche besondere Lage haben die Geraden ss′ und $s_1 s_1'$?)

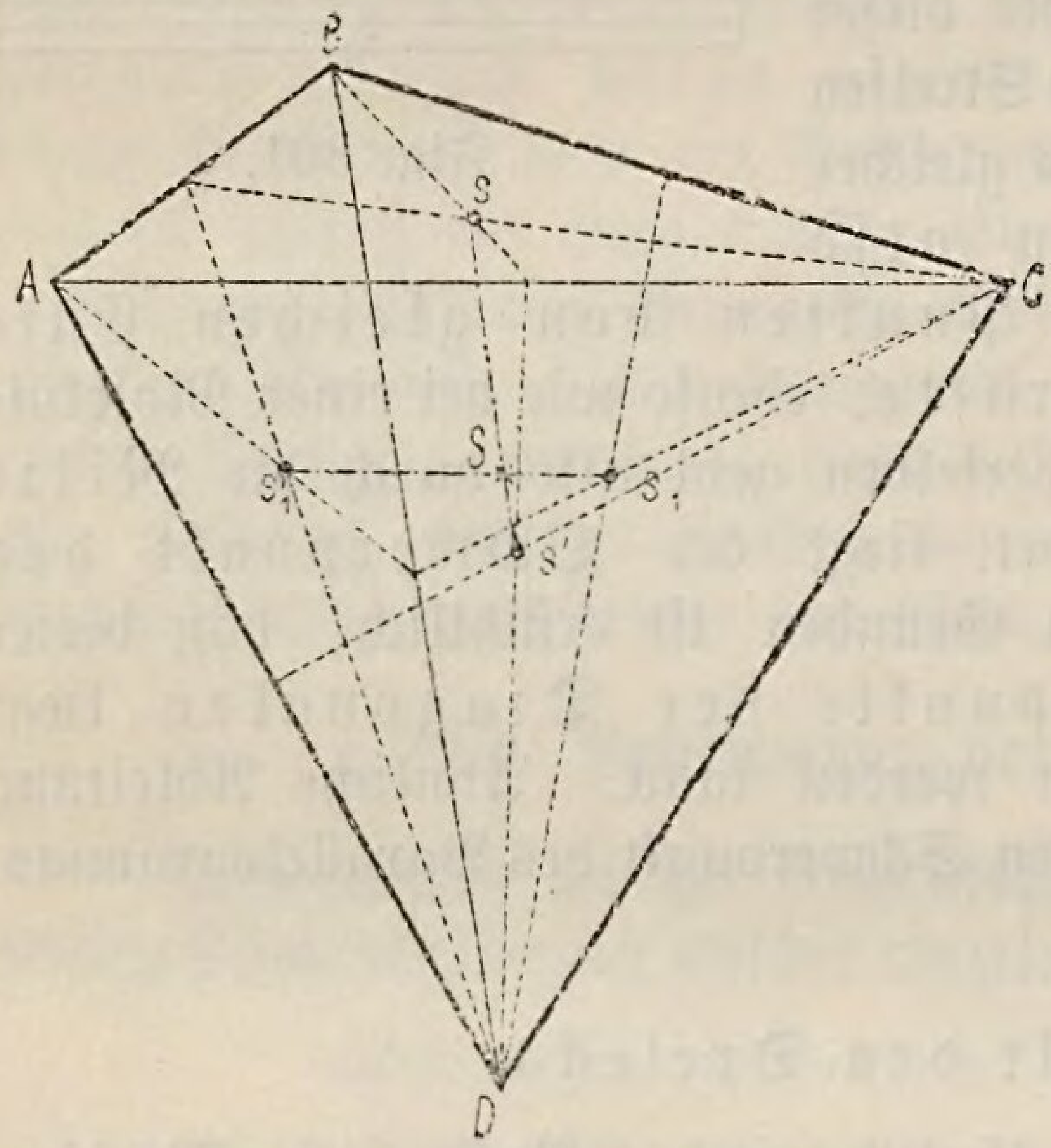


Fig. 303.

Der Schwerpunkt des Fünfecks wird ähnlich gefunden, indem man dasselbe durch eine Diagonale in ein Dreieck und ein Viereck zerlegt und von jedem den Schwerpunkt sucht; die Verbindungslinie der Schwerpunkte ist dann eine Schwerlinie. Zerlegt man das Fünfeck durch eine andere Diagonale und verfährt ebenso, so erhält man noch eine Schwerlinie; der Schnittpunkt beider ist der Schwerpunkt. Ähnlich kann man bei einem Sechseck, Siebeneck u. s. w. verfahren, doch wird das Verfahren bald unleidlich langweilig.

244. Schwerpunkt einfach zusammengesetzter Flächen.

Ist eine ebene Figur aus einfachen Stücken zusammengesetzt, so kann man den Schwerpunkt auf folgende Art berechnen. Man berechnet das Gewicht jedes Flächenstückes, wobei man, wenn alle Stücke aus demselben Stoffe bestehen, die Flächenzahl als Gewichtszahl benützen, also etwa setzen kann: Rechteck $= 12 \cdot 48 = 576\ g$.

Man denkt sich diese Gewichte in den zugehörigen Schwerpunkten angebracht und läßt sie, indem man ihre Angriffspunkte in den Richtungen der Kräfte verlegt, auf eine gerade Linie z. B. auf die untere Grenzlinie wirken. Die Resultierende ist in unserer Figur $= 576 + 416 + 400 = 1392$. Nimmt man etwa den linken End-

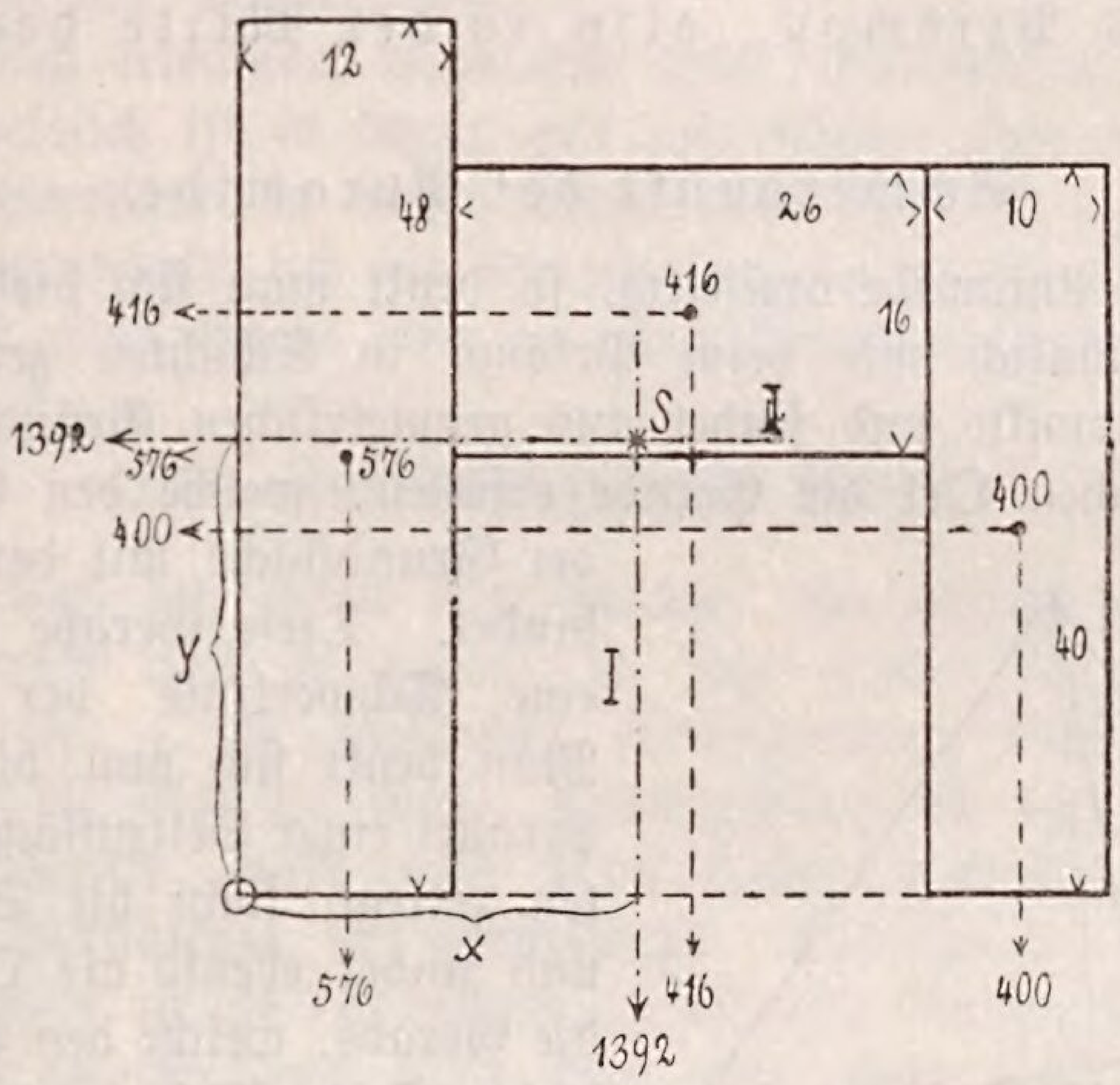


Fig. 304.

punkt als Drehpunkt an und setzt die Entfernung des Angriffspunktes der Resultierenden vom linken Endpunkt $= x$, so hat man die Momentengleichung: $576 \cdot 6 + 416 \cdot 25 + 400 \cdot 43 = 1392 \cdot x$; $x = 22{,}3$.

Da in dieser Entfernung die Resultierende wirkt, so kann man eine in dieser Entfernung gezogene Parallele als Schwerlinie I ansehen.

Nun denkt man sich die Schwerkraft nach einer anderen Richtung wirkend, etwa nach links und erhält die Momentengleichung:

$$400 \cdot 20 + 576 \cdot 24 + 416 \cdot 32 = 1392 \cdot y; \; y = 25{,}2.$$

In der Entfernung $y = 25{,}2$ liegt die Schwerlinie II. Im Schnittpunkt beider Schwerlinien liegt der Schwerpunkt S der Figur.

245. Schwerpunkt der Körper.

Schwerpunkt des Prismas.

Man denke sich das Prisma parallel zur Grundfläche in sehr viele, sehr dünne Schichten von gleicher Dicke zerschnitten, so daß jede Schichte etwa bloß eine Molekülschichte enthält, also jede Schichte anzusehen ist als eine Fläche; die Schwerpunkte derselben erfüllen als geometrischen Ort eine gerade Linie, welche die Schwerpunkte der Grund- und Deckfläche verbindet, Schwerachse. Denkt man

sich das Gewicht jeder Schichte in ihrem Schwerpunkte vereinigt, so hat man auf dieser Linie Punkte, die gleich weit von einander entfernt sind, und an denen gleiche Kräfte wirken; die Resultierende dieser Kräfte geht demnach durch die Mitte dieser Linie. **Der Schwerpunkt des Prismas liegt in der Mitte der Verbindungslinie der Schwerpunkte der beiden Gegenflächen des Prismas, also in der Mitte der Schwerachse.**

Schwerpunkt der Pyramide.

Ist die Pyramide dreiseitig, so denkt man sich dieselbe parallel der Basis, ähnlich wie beim Prisma in Schichten zerlegt, sucht deren Schwerpunkte und findet aus geometrischen Gründen, daß sie als geometrischen Ort die Gerade erfüllen, welche den Schwerpunkt der Grundfläche mit der Spitze verbindet. Diese Gerade ist deshalb eine Schwerlinie der Pyramide. Man denkt sich nun die Pyramide parallel einer Seitenfläche in Schichten zerlegt, sucht die Schwerpunkte und findet ebenso als Ort derselben die Gerade, welche den Schwerpunkt dieser Seitenfläche mit der gegenüberliegenden Ecke verbindet; das ist also eine zweite Schwerlinie. Aus physikalischen wie aus geometrischen Gründen folgt, daß beide Schwerlinien sich schneiden, ihr Schnittpunkt ist der Schwerpunkt der Pyramide. Man beweist geometrisch, daß dieser Schwerpunkt im ersten Viertel der Schwerlinie, von der Fläche aus gerechnet, liegt.

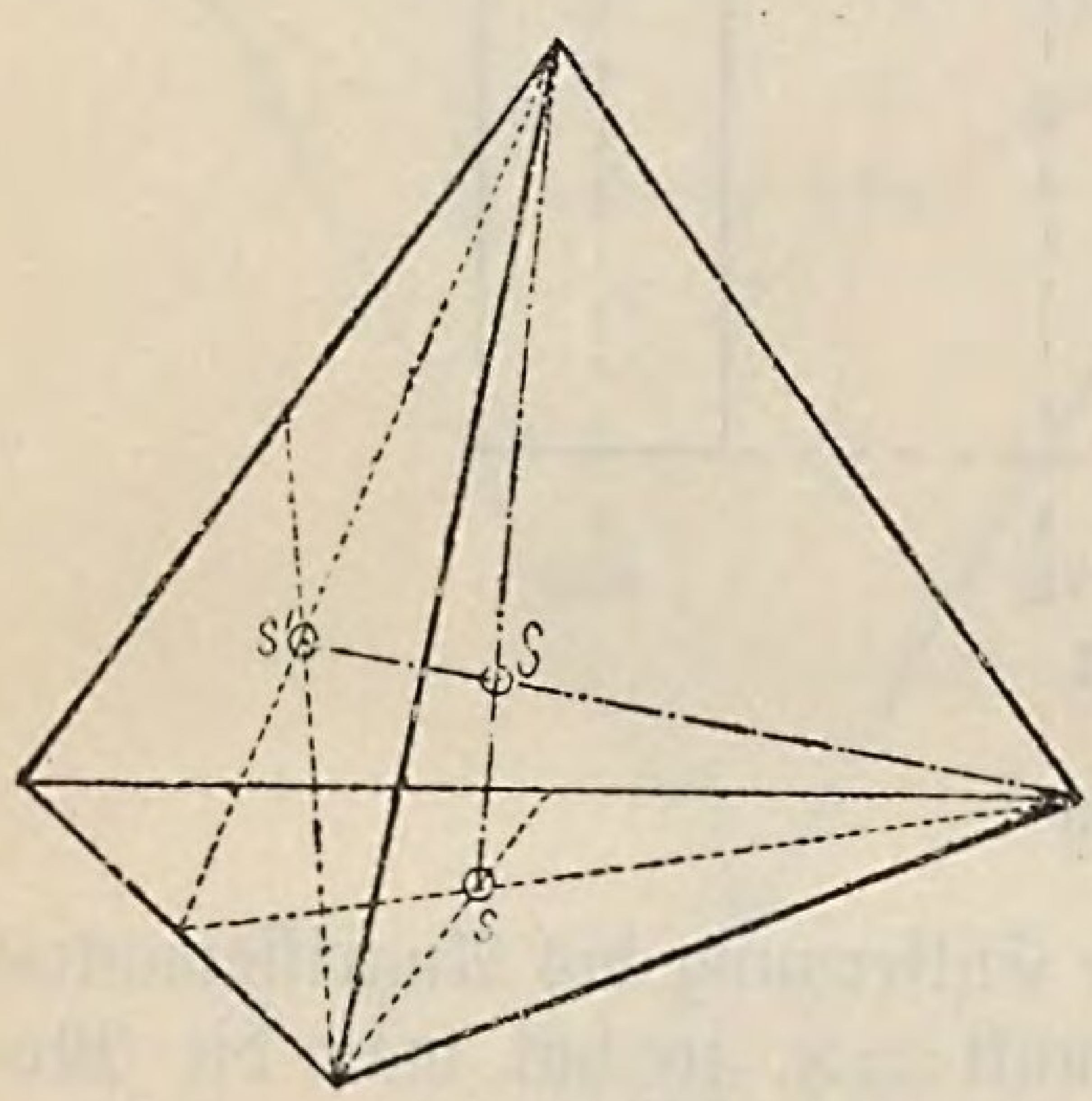


Fig. 305.

Den Schwerpunkt der mehrseitigen Pyramiden findet man, indem man den Schwerpunkt der Grundfläche mit der Spitze verbindet und auf dieser Schwerlinie das erste Viertel von der Basis aus nimmt.

Ebenso findet man den Schwerpunkt eines Kegels.

246. Schwerpunkt zusammengesetzter Körper.

Ist ein Körper in Prismen und Pyramiden zerlegbar, so verfährt man ähnlich, wie bei den aus Drei- und Vierecken bestehenden Flächen. Man berechnet die Gewichte der einzelnen Teile und denkt sich diese Gewichte als Kräfte in den Schwerpunkten der einzelnen Körperteile angreifend. Wirken nun diese Kräfte auf eine Ebene, die zu ihrer Richtung senkrecht steht, so kann man den Angriffspunkt der Resultierenden auf dieser Ebene suchen, ähnlich wie man

den Schwerpunkt einer Fläche sucht. Zieht man durch diesen Angriffspunkt eine Parallele zur Richtung der Kräfte, so ist dies eine Schwerlinie. Denkt man sich nun die Schwerkraft noch in einer anderen Richtung wirkend, etwa senkrecht zu dieser Schwerlinie, und so die Gewichte der einzelnen Teile auf dieser Schwerlinie angreifend, so kann man auch hier den Angriffspunkt der Resultierenden suchen; dieser ist dann der Schwerpunkt.

Wesentlich erleichtert wird eine solche Berechnung, wenn der Körper symmetrisch ist in bezug auf eine Ebene oder eine Gerade, weil sein Schwerpunkt in dieser Ebene oder Geraden liegt.

Auch vereinfacht sich die Berechnung, wenn die Schwerpunkte aller Teile in einer Ebene oder in einer Geraden liegen.

247. Zusammengesetzter Hebel.

Wenn man den Hebel dazu benützt, um mittels einer kleinen Kraft eine große Last zu heben, so sagt man, er liefert einen Kraftgewinn, z. B. vierfachen Kraftgewinn, wenn die Kraft 4mal kleiner ist als die Last. **Kraftgewinn ist das Verhältnis von Last zu Kraft, wird also beim Hebel gemessen durch das (umgekehrte) Verhältnis der Hebelarme.** Ein Hebel, dessen einer Arm 5mal länger ist als der andere, liefert also 5fachen Kraftgewinn.

In der Anwendung kann man nun nicht gut einen Hebel von beträchtlich großem oder beliebig großem Kraftgewinne machen; denn, schon um etwa einen 1000fachen Kraftgewinn zu erzielen, müßten die Hebelarme 1 *mm* und 1 *m*, oder 1 *cm* und 10 *m* sein, was beides praktisch nicht wohl gemacht werden kann. Dagegen ist ein Hebel von 10fachem Kraftgewinne etwa mit den Hebelarmen von 10 *cm* und 100 *cm* noch ein handliches Instrument.

Für größeren Kraftgewinn benützt man den zusammengesetzten Hebel; er besteht aus mehreren Hebeln, die so angebracht sind, daß immer das Ende des einen Hebels auf den Anfang

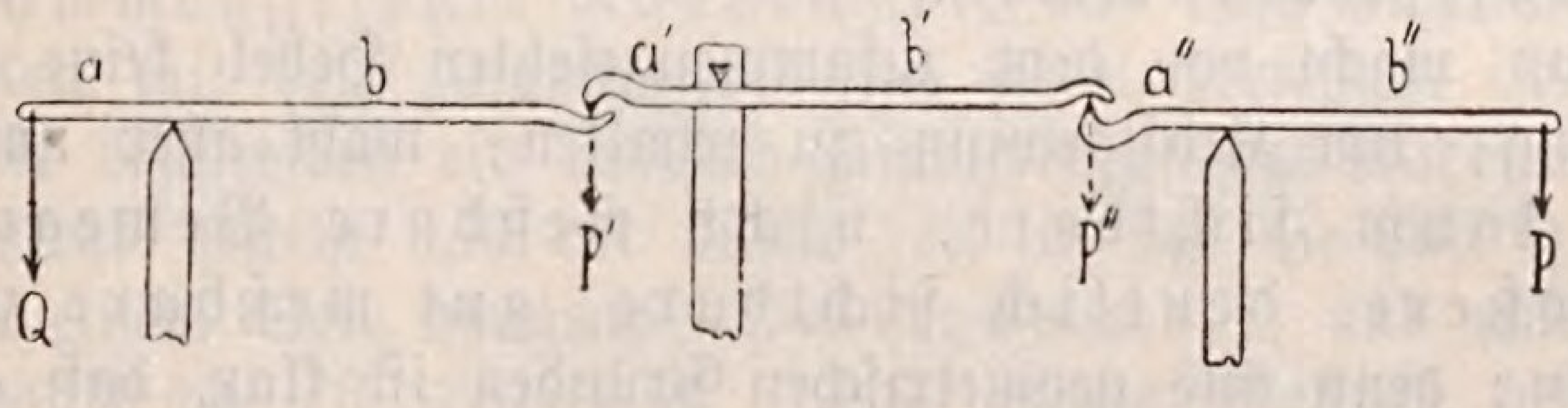


Fig. 306.

des folgenden drückt. Es bleibt der Anfang des ersten und das Ende des letzten frei, und an diesen wirken Kraft und Last.

Haben wir etwa einen dreifach zusammengesetzten Hebel (Fig. 306), und es wirkt an a die Last Q, so muß an b die Kraft P′ wirken, so daß:

1) $Q:P' = b:a$.

Anstatt die Kraft P' wirklich anzubringen, betrachte ich sie als Last, die an a' wirkt; also muß an b' die Kraft P'' wirken, so daß:

2) $P':P'' = b':a'$.

Anstatt die Kraft P'' wirklich anzubringen, betrachte ich sie als Last, die in a'' wirkt; also muß an b'' die Kraft P wirken, so daß:

3) $P'':P = b'':a''$.

Wenn Q und die Hebelarme bekannt sind, so kann ich aus diesen drei Gleichungen nacheinander die Unbekannten P', P'', P berechnen, oder wenn nur P gefunden werden soll, durch Multiplikation die drei Gleichungen sofort erhalten:

$$Q:P = b\,b'\,b'':a\,a'\,a''.$$

Nennen wir die der Kraft P zugewendeten Hebelarme b, b', b'' die Kraftarme, die anderen die Lastarme, so heißt dieser Satz: **Der zusammengesetzte Hebel ist im Gleichgewichte, wenn sich die Last zur Kraft verhält wie das Produkt aller Kraftarme zum Produkt aller Lastarme;** oder wenn:

$Q \cdot a\,a'\,a'' = P \cdot b\,b'\,b''$, d. h. wenn die Last mal allen Lastarmen gleich ist der Kraft mal allen Kraftarmen; es ist leicht zu sehen, daß das Gesetz ebenso gilt, wenn man eine andere Anzahl als drei Hebel nimmt. Der Kraftgewinn $\frac{Q}{P}$ ist aus obiger Gleichung: $\frac{Q}{P} = \frac{b\,b'\,b''}{a\,a'\,a''} = \frac{b}{a} \cdot \frac{b'}{a'} \cdot \frac{b''}{a''}$; aber $\frac{b}{a}$ ist der Kraftgewinn des ersten Hebels, $\frac{b'}{a'}$ der des zweiten, $\frac{b''}{a''}$ der des dritten; also **der Kraftgewinn des zusammengesetzten Hebels ist gleich dem Produkte der Kraftgewinne der einzelnen Hebel.** Man kann demnach leicht einen tausendfachen Kraftgewinn erzielen, wenn man drei Hebel zusammensetzt, deren jeder einen zehnfachen Kraftgewinn hat; man kann also großen Kraftgewinn erzielen, ohne daß die einzelnen Hebel unpraktische Verhältnisse bekommen.

Man macht von dem zusammengesetzten Hebel keine wichtige Anwendung, um Kraftgewinn zu erhalten, wohl aber um eine kleine, kaum sichtbare, nicht meßbare Bewegung in eine größere, deutlich sichtbare, gut meßbare zu verwandeln; denn aus geometrischen Gründen ist klar, daß auch die Wege, die Q und P beim Drehen zurücklegen, sich verhalten wie $a\,a'\,a'':b\,b'\,b''$. Wenn also das Ende von a nur eine ganz kleine Bewegung macht, so macht das von b'' eine viel größere. Eine solche Vorrichtung nennt man dann Fühlhebel, und wir haben solche schon kennen gelernt beim Aneroidbarometer und beim Muschenbroekschen Apparat zur Messung der Ausdehnung.

Wir betrachten die Arbeiten, welche die zwei an einem Hebel

angreifenden Kräfte verrichten, und haben hierüber schon früher gefunden, daß beide Arbeiten einander gleich sind. Da nämlich die Kräfte sich verhalten umgekehrt wie die Hebelarme

$$P : Q = b : a$$

und die Kraftwege sich verhalten gerade so wie die Hebelarme.

(Weg P) : (Weg Q) = a : b, so folgt (durch Multiplikation beider Proportionen):

$$P \cdot (\text{Weg } P) = Q \cdot (\text{Weg } Q).$$

Da aber Kraft mal Weg das Maß der Arbeit ist, so heißt das: die Arbeit der Kraft ist gleich der Arbeit der Last.

Da beim zusammengesetzten Hebel ebenso ist:

$$P : Q = a . a' . a'' = b . b' . b'' \text{ (Fig. 306)},$$

und ebenso geometrisch ersichtlich ist, daß die Kraftwege sich gerade so verhalten, wie die Produkte der Hebelarme

$$(\text{Weg } P) : (\text{Weg } Q) = b . b' . b'' : a . a' . a'',$$

so folgt durch die Multiplikation beider Proportionen

P · (Weg P) = Q · (Weg Q), d. h. auch beim zusammengesetzten Hebel ist die Arbeit der Kraft gleich der Arbeit der Last. Es wird also auch beim zusammengesetzten Hebel nichts an Arbeit gewonnen, sondern nur erreicht, daß man durch eine kleine Kraft eine große Last überwinden kann.

Diesen Satz von der Gleichheit der Arbeit werden wir bei allen Maschinen bestätigt finden und ihn das Gesetz der Maschinen nennen; es ist derselbe Satz, den wir früher die goldene Regel der Mechanik genannt haben.

248. Das zusammengesetzte Räderwerk.

Wie beim einfachen Hebel ist auch beim Wellrad der Kraftgewinn in der Anwendung meist nur ein bescheidener, 2 bis 5facher, da man weder die Kurbel besonders lang, noch die Welle besonders dünn machen darf. Will man größeren Kraftgewinn, so benützt man das zusammengesetzte Räderwerk, das nach Einrichtung und Wirksamkeit mit dem zusammengesetzten Hebel verwandt ist.

Wir beschreiben ein dreifach zusammengesetztes Räderwerk: das erste Wellrad besteht aus der Welle (r), an der die Last Q angreift (etwa an einem Seil hängend, Seiltrommel), und einem Rade (R); dies Rad ist gezahnt. Das zweite Wellrad besteht aus einer gezahnten Welle (r'), deren Zähne in die des ersten Rades (R) eingreifen, und einem gezahnten Rade (R'). Das dritte Wellrad besteht aus der gezahnten Welle (r''), deren Zähne in die des Rades (R') eingreifen, und der Kurbel R'', an der die Kraft P wirkt. Wie wir das einfache Wellenrad als Hebel betrachtet haben, so können wir das zusammengesetzte Räderwerk als zusammengesetzten Hebel betrachten. Die Mittelpunkte der Wellräder

sind die Drehpunkte der Hebel, die Radien der Wellen (r, r′, r″) sind die Lastarme, die Radien der Räder (R, R′ und die Kurbel R″) sind die Kraftarme der Hebel, zwei Zähne, die sich eben berühren, sind die Enden der Hebel, die auf einander drücken. Man

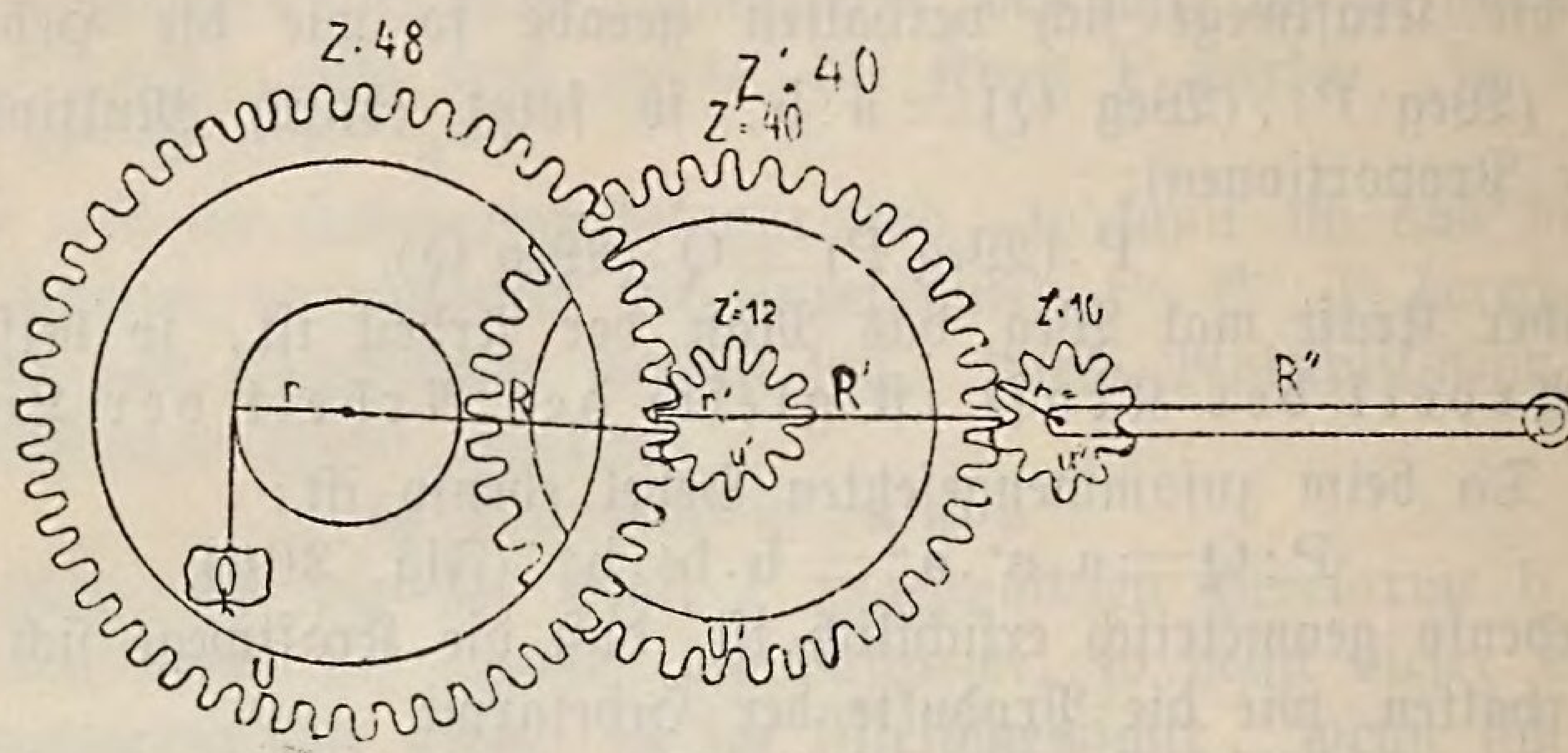


Fig. 307.

kann demnach das Gesetz vom zusammengesetzten Hebel hierauf anwenden und sagen:

Das zusammengesetzte Räderwerk ist im Gleichgewichte, wenn $P : Q = r\,r'\,r'' : R\,R'\,R''$; der Kraftgewinn ist $\frac{Q}{P} = \frac{R\,R'\,R''}{r\,r'\,r''}$.
Es gilt auch hier das Gesetz der Maschine, daß die Arbeit der Kraft gleich ist der Arbeit der Last. Diesen Ausdruck für den Kraftgewinn kann man in bequemere Form bringen; es ist:

$$\frac{Q}{P} = \frac{R\,R'\,R''}{r\,r'\,r''} = \frac{2\,R\pi \cdot 2\,R'\pi \cdot R''}{r \cdot 2\,r'\pi \cdot 2\,r''\pi} = \frac{U\,U'R''}{r\,u'\,u''}$$

wobei mit U, U′, u′, u″ die Umfänge der entsprechenden Räder und gezahnten Wellen bezeichnet sind. Greift man aus diesem Bruche das Verhältnis $U : u'$ heraus, so sind auf U und u′ Zähne, welche in einander greifen sollen, also gleich weit von einander abstehen müssen; folglich müssen sich diese Zahnzahlen Z und z′ ebenso wie die Umfänge verhalten, also $\frac{U}{u'} = \frac{Z}{z'}$; nimmt man ebenso $U' : u''$, so sind auch auf diesen Umfängen Zähne, die in einander greifen, deren Anzahlen sich also auch wie die Umfänge verhalten, so daß also $\frac{U'}{u''} = \frac{Z'}{z''}$; beides oben eingesetzt gibt: $\frac{Q}{P} = \frac{Z\,Z'\,R''}{r\,z'\,z''}$.
Diese Form für den Kraftgewinn ist ganz entsprechend der zuerst aufgestellten, nur sind statt der Radien derjenigen Räder und Wellen, die gezahnt sind, die betreffenden Zahnzahlen eingesetzt. Es ist dadurch an einer fertigen Maschine leicht, den Kraftgewinn zu bestimmen. Eine gezahnte Welle wird auch Trieb genannt, und zwar Vierertrieb, Sechser-, Achter-, Zwölfer-Trieb u. s. w., wenn sie 4, 6, 8, 12, . . . Zähne hat.

249. Anwendungen der zusammengesetzten Räderwerke.

Die Aufzugswinde, wie sie bei Bauten, Magazinen u. s. w. zur Anwendung kommt, ist gewöhnlich zweifach zusammengesetzt: Das

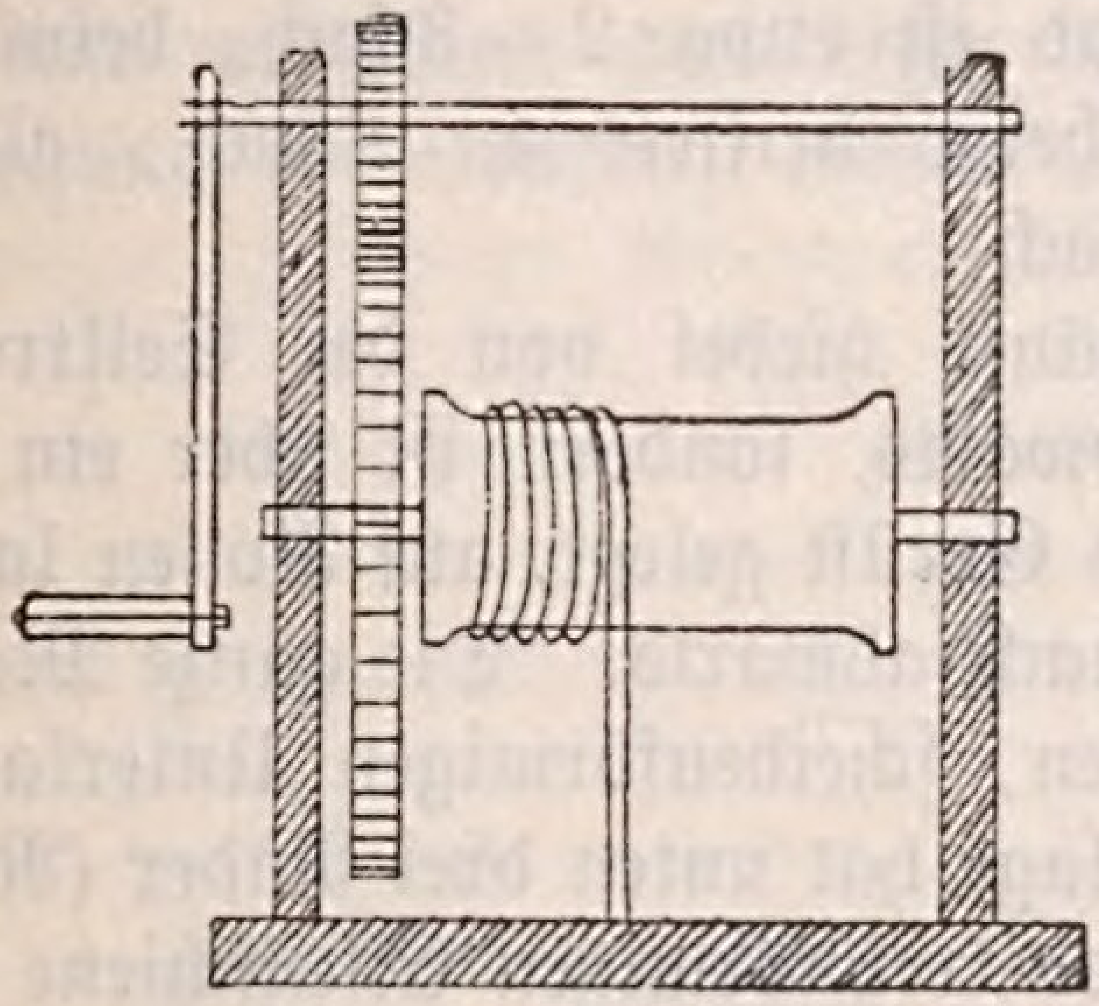


Fig. 308a.

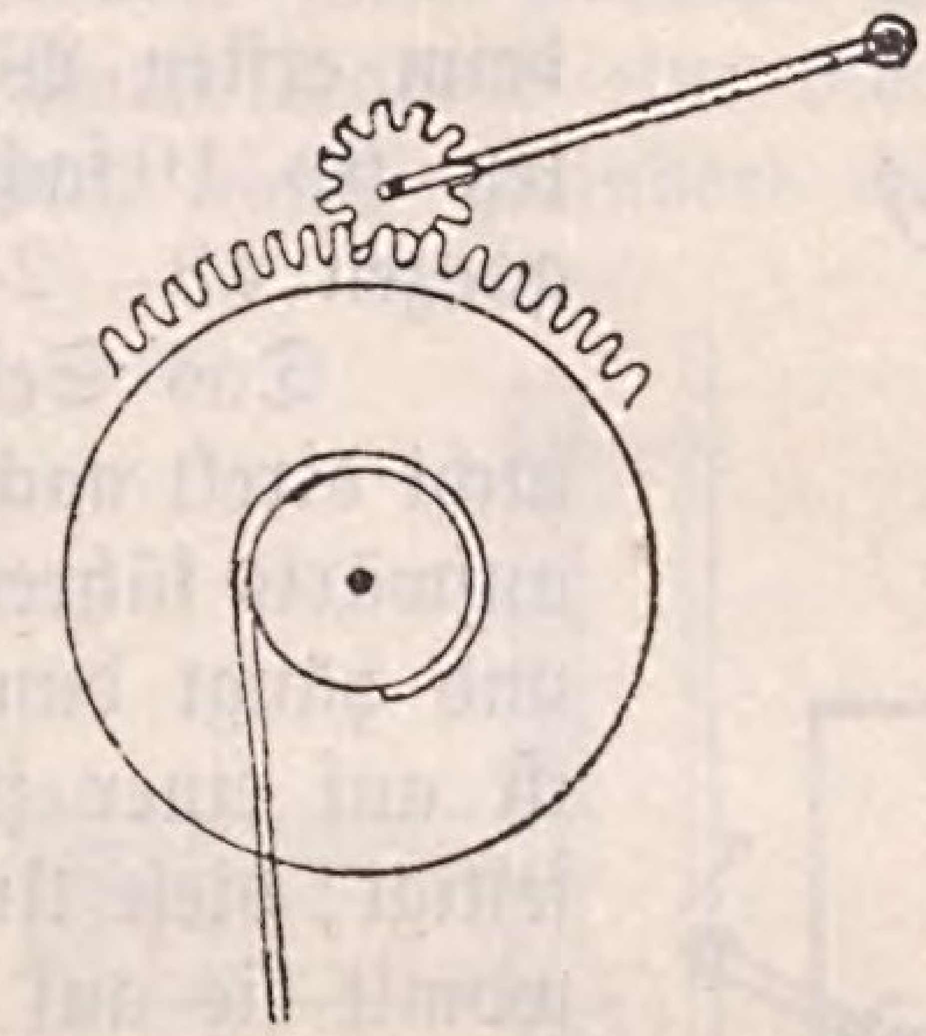


Fig. 308b.

erste Wellenrad besteht aus Seiltrommel und Zahnrad; der Kraftgewinn ist gering, zwei bis dreifach, weil die Seiltrommel

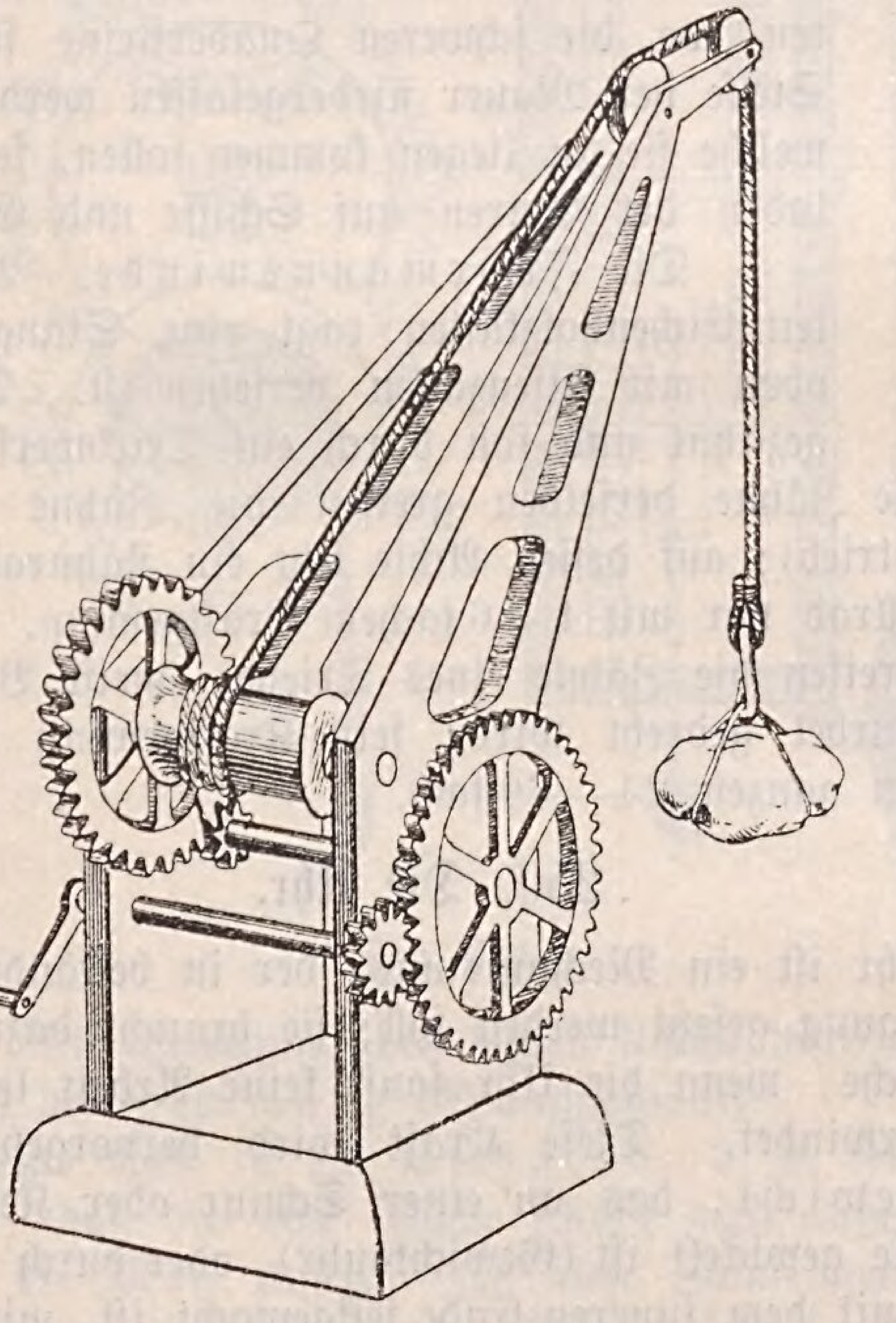
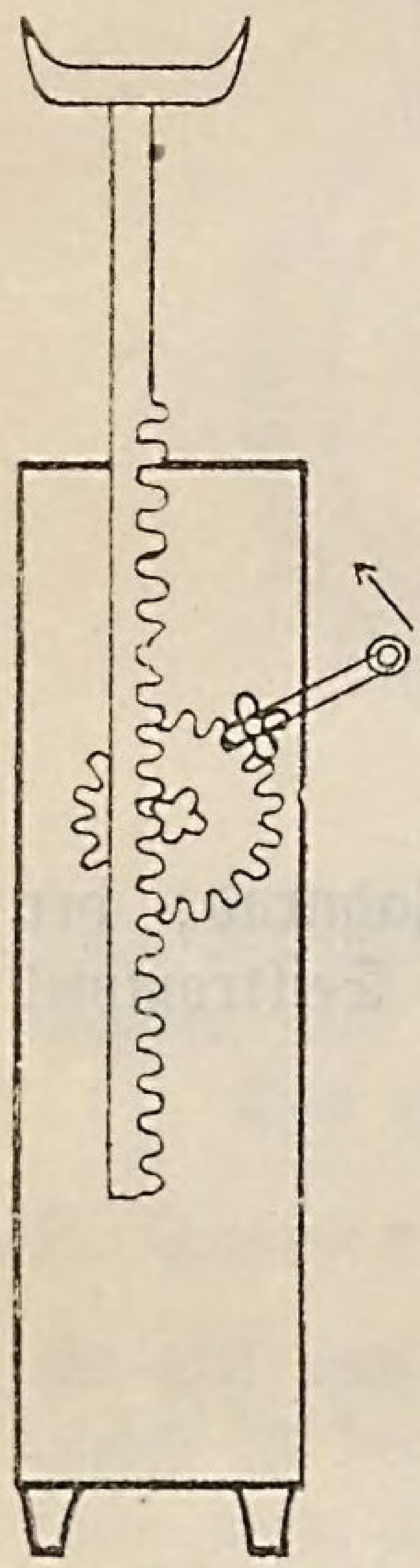


Fig. 309.

ziemlich dick sein muß. Das zweite Wellenrad besteht aus Trieb und Kurbel, meist Doppelkurbel für zwei Arbeiter; Kraftgewinn fünf- bis zehnfach; also Kraftgewinn der Maschine zehn- bis dreißigfach.

Der Krahnen, eine größere Aufzugsmaschine, ist meist dreifach zusammengesetzt und wird bei großen Bauten, sowie beim Ein- und Ausladen der Schiffe verwendet. Seine Einrichtung ist meist wie die schon beschriebene dreifach zusammengesetzte Maschine; Kraftgewinn beim ersten Wellrad ist etwa 2—3 fach, beim zweiten 6—10 fach, beim dritten 4—8 fach, also im ganzen 48—240 fach.


Fig. 310.

Das Seil läuft hiebei von der Seiltrommel nicht direkt nach abwärts, sondern ist über ein schräg aufwärts führendes Gerüst gelegt, auf Rollen laufend, und hängt dann nach abwärts. Die ganze Maschine ist auf einer starken, scheibenförmigen Unterlage befestigt; diese Unterlage hat unten drei Räder (Rollen), womit sie auf einer kreisförmigen Eisenschiene läuft, so daß, wenn die Last auf genügende Höhe gehoben ist, der ganze Krahnen gedreht werden kann, und nun die Last über dem Orte schwebt, auf den man sie niederzulassen wünscht. Dies ist bequem bei Bauten, da die schweren Quadersteine sogleich auf die Stelle der Mauer niedergelassen werden können, auf welche sie zu liegen kommen sollen, ferner beim Verladen der Waren auf Schiffe und Eisenbahnwagen.

Die Fuhrmannswinde. Aus einem starken Eichenholzkasten ragt eine Stange heraus, die oben mit Eisenzacken versehen ist. Die Stange ist gezahnt und soll durch ein Triebwerk gehoben werden. In die Zähne derselben greifen die Zähne eines Triebes (meist Vierertrieb); auf dessen Achse sitzt ein Zahnrad; beide stellen das erste Wellrad vor mit 4—6 fachem Kraftgewinn. In die Zähne des Rades greifen die Zähne eines Triebes (meist Vierertrieb), der durch eine Kurbel gedreht wird; sein Kraftgewinn ist 6—10 fach, also ist er im ganzen 24—60 fach.

250. Die Uhr.

Die Uhr ist ein Mechanismus, der in beständige und gleichmäßige Bewegung gesetzt werden soll; sie braucht dazu zunächst eine Kraft, welche, wenn die Uhr sonst keine Arbeit leisten soll, die Reibung überwindet. Diese Kraft wird hervorgebracht entweder durch ein Gewicht, das an einer Schnur oder Kette hängt, die um eine Welle gewickelt ist (Gewichtsuhr), oder durch eine Spiralfeder, die mit dem inneren Ende festgemacht ist, mit dem äußeren am Umfange einer Welle angreift und, wenn sie gespannt, aufgezogen ist, diese Welle zu drehen sucht (Federuhr).

Die durch die treibende Kraft hervorgebrachte Bewegung soll vielmal größer gemacht werden; dies geschieht durch ein mehr-

fach zusammengesetztes Räderwerk, das Triebwerk: mit der Welle ist ein Zahnrad verbunden; dies greift in den Trieb des zweiten Wellrades; das Rad desselben ist auch gezahnt, und so geht es fort, so daß im ganzen 4—7 Achsen verwendet sind, jede mit Trieb und Zahnrad versehen; das letzte Rad macht deshalb eine viel größere Bewegung und würde, wenn es durch nichts gehindert wäre, sehr

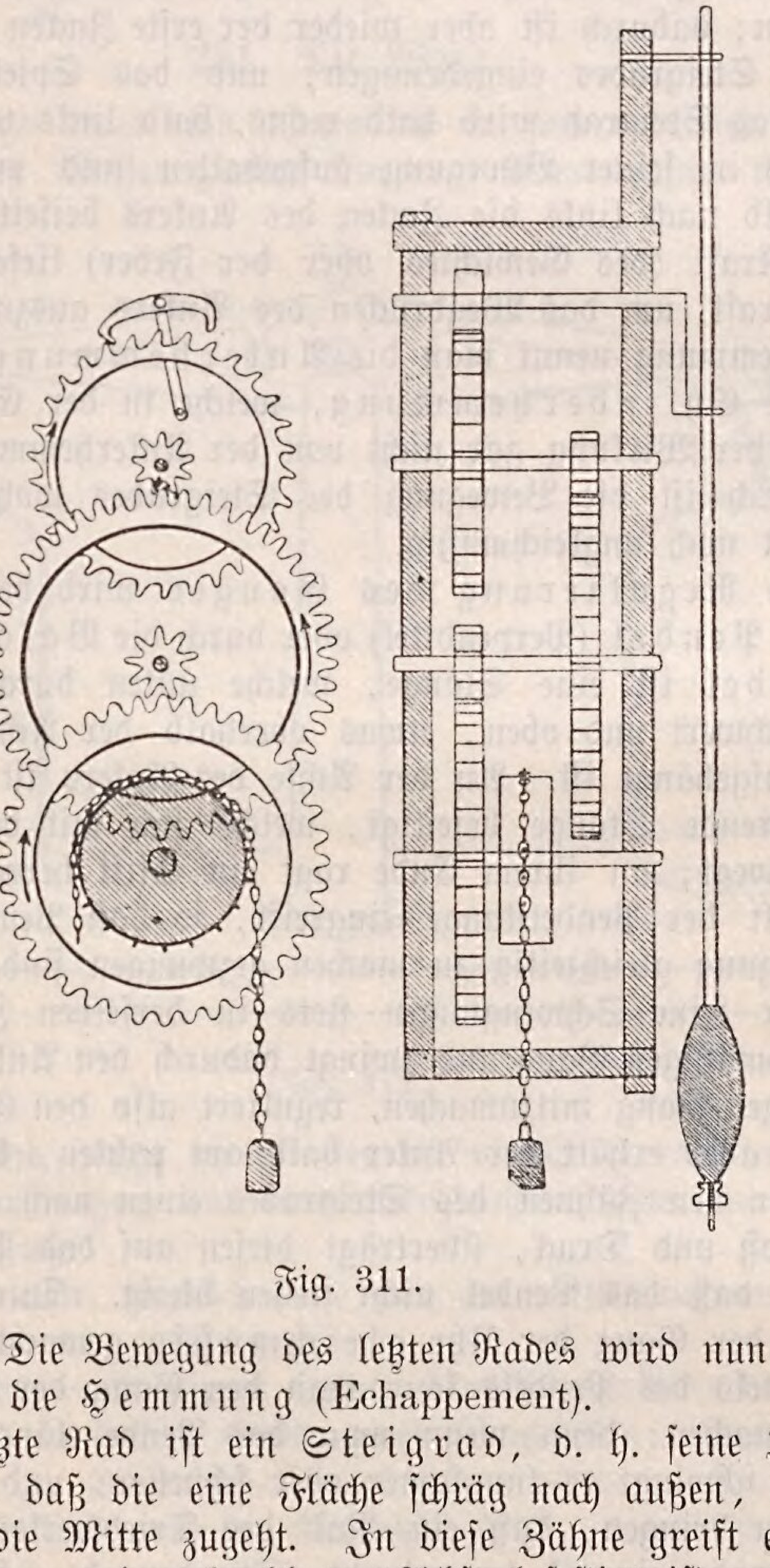


Fig. 311.

rasch laufen. Die Bewegung des letzten Rades wird nun langsamer gemacht durch die Hemmung (Echappement).

Das letzte Rad ist ein Steigrad, d. h. seine Zähne sind so geschnitten, daß die eine Fläche schräg nach außen, die andere Fläche gegen die Mitte zugeht. In diese Zähne greift ein Anker ein, der oben an einer drehbaren Achse befestigt ist und nach abwärts zwei keilförmige Zacken hat, welche zwischen die Lücken des Steigrades hineinragen. Wenn sich nun das Steigrad zu drehen sucht, so stößt es mit einem Zahne gegen den einen Zacken des Ankers, drückt ihn beiseite nach auswärts, bis es an diesem Zacken

vorbei kann; aber dadurch, daß dieser Zacken nach auswärts, gedrückt, also der Anker etwas gedreht wurde, ist der andere Zacken des Ankers auf der anderen Seite in eine Lücke des Steigrades eingedrungen; das Steigrad, am ersten Zacken vorbeigekommen, stößt nun auf der anderen Seite gegen den anderen Zacken des Ankers, wird also schon wieder in seiner Bewegung gehemmt, und muß nun mittels seines Zahnes diesen Zacken nach auswärts drücken, bis es vorbei kann; dadurch ist aber wieder der erste Zacken in die folgende Lücke des Steigrades eingedrungen, und das Spiel beginnt von neuem. Das Steigrad wird bald rechts, bald links von den Zacken des Ankers in seiner Bewegung aufgehalten und muß bald nach rechts, bald nach links die Zacken des Ankers beiseite drücken; die treibende Kraft (des Gewichtes oder der Feder) liefert dem Steigrad die Kraft, um das Wegdrücken des Ankers auszuführen. Diese Art der Hemmung nennt man die Ankerhemmung; von anderer Art ist die Cylinderhemmung, welche in der Einrichtung nur wenig, in der Wirkung gar nicht von der Ankerhemmung verschieden ist. Dadurch ist die Bewegung des Steigrades wohl verlangsamt, aber sie ist noch ungleichmäßig.

Die Regulierung des Ganges wird bewirkt entweder durch das Pendel (Perpendikel) oder durch die Balance (Unruhe). Das Pendel ist eine Stange, welche unten durch ein Gewicht (Linse) beschwert und oben, etwas oberhalb der Achse des Ankers, drehbar aufgehängt ist. An der Achse des Ankers ist eine nach abwärts führende Stange befestigt, welche sich mit dem Anker hin- und herbewegt; an ihrem Ende ragt ein Stift heraus, welcher in einen Spalt der Pendelstange eingreift, so daß Pendel und Anker ihre Bewegung gleichzeitig zu machen gezwungen sind. Ein Pendel macht aber seine Schwingungen stets in derselben Zeit, hat also einen gleichmäßigen Gang und zwingt dadurch den Anker, auch diesen gleichmäßigen Gang mitzumachen, reguliert also den Gang der Uhr; umgekehrt aber erhält der Anker bald am rechten, bald am linken Zapfen von den Zähnen des Steigrades einen nach auswärts wirkenden Stoß und Druck, überträgt diesen auf das Pendel und bewirkt so, daß das Pendel nicht stehen bleibt. Durch das Pendel wird also der Gang der Uhr gleichmäßig gemacht.

Mittels des Pendels kann man den Gang der Uhr nun auch richtig machen; denn wenn man das Pendel länger oder kürzer macht, so schwingt es langsamer oder schneller, und man kann es leicht dahin bringen, daß ein Rad des Triebwerkes sich in einer Stunde gerade einmal herumdreht (Stundenrad). Man steckt auf die verlängerte Achse dieses Rades einen Zeiger, läßt ihn vor einem Zifferblatte (geteiltem Kreise) sich drehen und kann dann an seinem Stande sehen, wie viele Teile einer Stunde schon verflossen sind (Minutenzeiger). Macht man diese Bewegung 12mal langsamer,

so hat man den Stundenzeiger. Hat man im Triebwerk ein Rad, das sich 60 mal rascher dreht als das Stundenrad, das sich also in einer Minute herumdreht, so kann man auf demselben einen Zeiger befestigen, an welchem man die Sekunden ablesen kann (Sekundenzeiger).

Der Erfinder der Pendeluhr ist Huyghens (1657); er erfand die Ankerhemmung, die Anwendung des Pendels und der Unruhe.

251. Die Wage.

Die Wage dient zum wägen, d. h. zum vergleichen der Gewichte, also der Massen zweier Körper. Man benützt hiezu meist

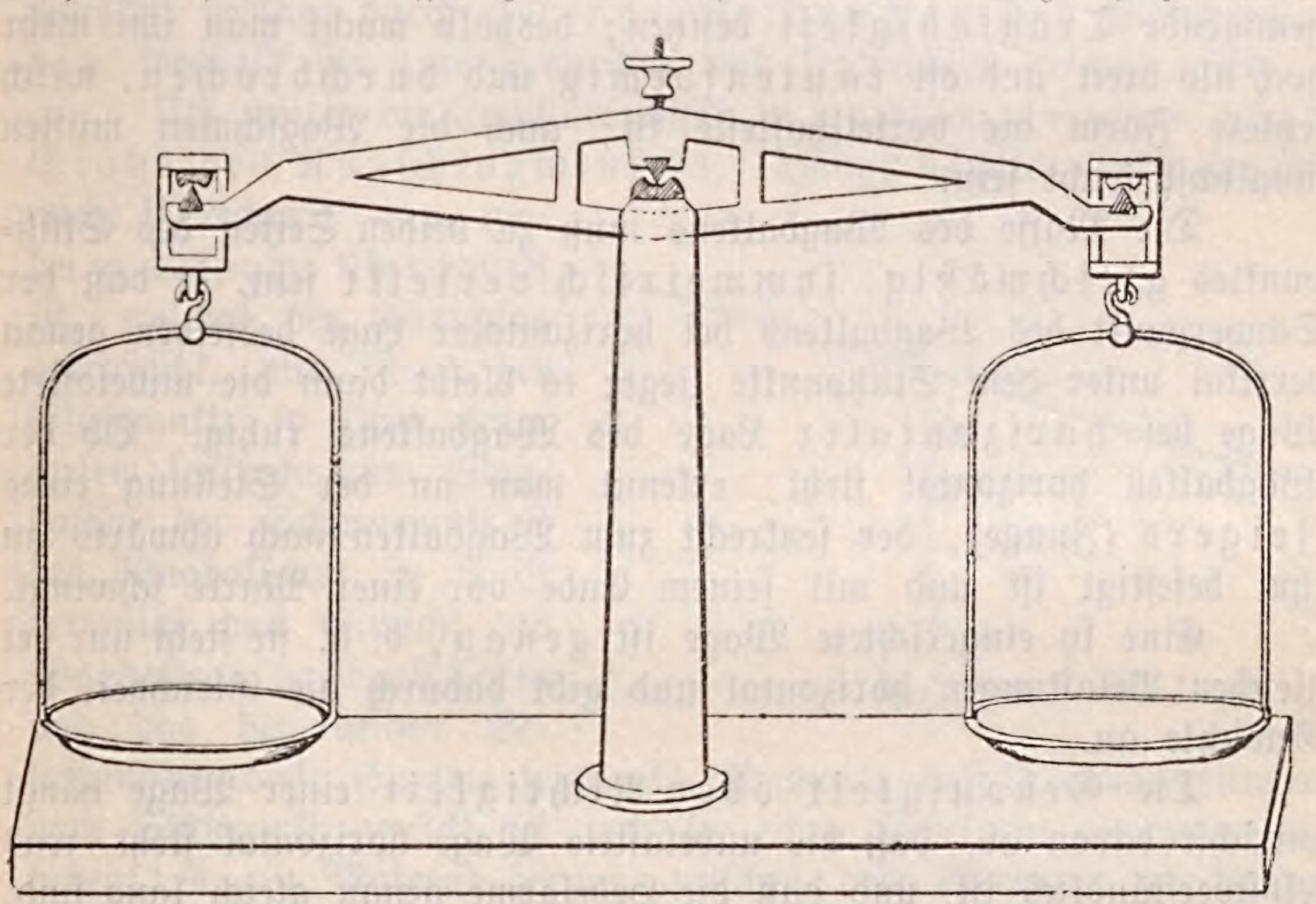


Fig. 312.

einen Hebel, und hängt die Massen an die Hebelarme, wodurch sie Momente hervorbringen, aus deren Vergleichung man auf die Größe der Massen schließt.

Die einfachste, zugleich beste und am meisten verwendete Wage ist die gleicharmige Wage.

Sie besteht aus einem Hebel, dem Wagbalken, dessen Arme gleich lang und an dessen Enden zwei Wagschalen aufgehängt sind, in welche die zu wägenden Körper gelegt werden. Da die Arme gleich sind, so sind auch die Gewichte gleich, wenn die Wage im Gleichgewichte ist.

Eine gute Wage muß folgende Einrichtung haben: Sie muß in ihrem Stützpunkte leicht drehbar sein; deshalb macht man den Stützpunkt in Form einer Stahlschneide, das ist ein keilförmiges Prisma aus gehärtetem Stahl, das in den Wagbalken

eingelassen ist und mit einer genau abpolierten, geraden, nach abwärts gerichteten Kante auf einer Stahl- oder Achatplatte oder einer schwach gekrümmten Stahlrinne ruht. Auch die Wagschalen hängen mit Stahlrinnen auf eben solchen Stahlprismen, die mit den Schneiden nach oben an den Enden des Wagbalkens angebracht sind. Diese drei Schneiden sind parallel, liegen in einer Ebene und müssen beim Aufstellen (oder Aufhängen) der Wage in horizontale Lage gebracht werden.

Die beiden Arme, d. h. die Entfernungen der beiden äußeren Schneiden von der mittleren müssen gleich lang sein.

Der Wagbalken soll möglichst leicht sein und doch genügende Tragfähigkeit besitzen; deshalb macht man ihn mehr hoch als breit, und oft rautenförmig und durchbrochen, welch letztere Form die vorteilhafteste ist; auch die Wagschalen müssen möglichst leicht sein.

Die Masse des Wagbalkens muß zu beiden Seiten des Stützpunktes gleichmäßig, symmetrisch verteilt sein, so daß der Schwerpunkt des Wagbalkens bei horizontaler Lage desselben genau vertikal unter dem Stützpunkte liegt; es bleibt dann die unbelastete Wage bei horizontaler Lage des Wagbalkens ruhig. Ob der Wagbalken horizontal steht, erkennt man an der Stellung eines Zeigers (Zunge), der senkrecht zum Wagbalken nach abwärts an ihm befestigt ist und mit seinem Ende vor einer Marke schwingt.

Eine so eingerichtete Wage ist genau, d. h. sie steht nur bei gleichen Belastungen horizontal und gibt dadurch die Gleichheit der Gewichte an.

Die Genauigkeit oder Richtigkeit einer Wage hängt zunächst davon ab, daß die unbelastete Wage horizontal steht, was selbstverständlich ist, und daß die Hebelarme genau gleich lang sind. Ob letzteres der Fall ist, kann man durch Messen der Hebelarme nicht genau finden, wohl aber durch folgendes Verfahren. Man legt auf die Wagschalen beliebige Gewichte, bis die Wage horizontal steht (einspielt), dann vertauscht man die beiden Gewichte und sieht zu, ob die Wage wieder einspielt; dies wird meistens nicht ganz genau der Fall sein; denn da die Arme stets, wenn auch oft nur sehr wenig an Länge verschieden sind, so hängt nun nach der Vertauschung das größere Gewicht am größeren Hebelarme und dreht deshalb den Balken. Man erkennt durch diesen Versuch nicht nur, welcher Arm länger ist (der längere geht abwärts), sondern kann auch den Grad der Genauigkeit erfahren; legt man nämlich noch so viele Gewichte zu, bis die Wage wieder einspielt, etwa $^1/_2\,g$ (a g) und vergleicht das mit der Belastung einer Schale, etwa $500\,g$ (b g), so ist die Genauigkeit $= \frac{1}{2000}\left(=\frac{a}{2b}\right)$; um diesen Teil der Belastung wird das Gewicht falsch angegeben.

Man kann auch mit einer ungenauen Wage richtig wägen durch Tarieren. Legt man nämlich auf die eine Schale den zu wägenden Körper, auf die andere beliebige Körper (die Tara) z. B. Steine, Schrotkörner, Sand ꝛc., bis die Wage einspielt, entfernt dann den zu wägenden Körper und legt an seine Stelle so viele Gewichte bis die Wage wieder einspielt, so sind diese Gewichte gleich dem Gewichte des Körpers; denn sie wirken an demselben Hebelarm und bringen dasselbe Moment hervor.

Außer der Genauigkeit muß die Wage auch Empfindlichkeit besitzen, d. h. die Eigenschaft, schon bei einem kleinem Übergewichte einen merkbaren Ausschlag zu geben. Empfindlichkeit ist zunächst bedingt durch geringe Reibung in den Stützpunkten, weshalb für gute Schneiden und Unterlagen gesorgt wird.

Um weiter die Empfindlichkeit zu beurteilen, berechnen wir die Größe des Ausschlagwinkels. Hängt nämlich links das Gewicht P, rechts P + p, wobei p dasjenige Übergewicht ist, welches den Ausschlag verursacht, und ist A der Stützpunkt, so liegt unter diesem senkrecht zum Wagbalken der Schwerpunkt S des Wagbalkens; in S ist vereinigt das Gewicht des Wagbalkens, das der Schalen und das der beiden Belastungen; diese Summe sei = Q. Dadurch, daß Q etwas seitwärts vom Stützpunkt gerückt ist und so einen Hebelarm gewonnen hat, bringt es ein Moment hervor, welches dem Moment des Übergewichtes das Gleichgewicht hält. Die Wage dreht sich also so weit bis Q.JA = p. l, wenn l die Länge eines Armes ist.

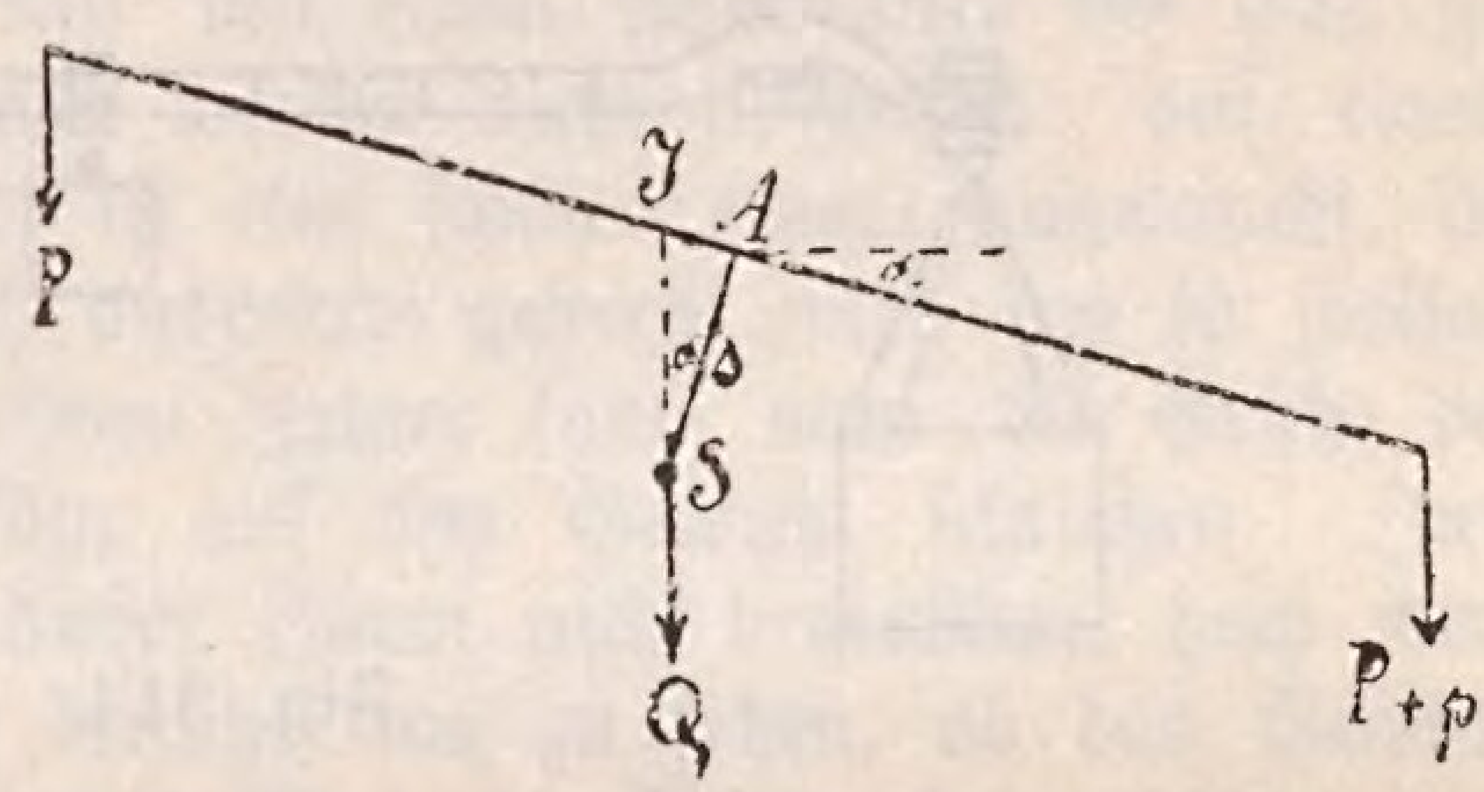


Fig. 313.

Nun ist JA = SA . tang α, dies eingesetzt giebt:

$$Q \,.\, SA \,.\, \mathrm{tang}\, \alpha = p \,.\, l, \text{ also}$$

$$\mathrm{tang}\, \alpha = \frac{p \,.\, l}{Q \,.\, SA}.$$

Soll der Ausschlagwinkel groß sein, so muß der Wert dieses Bruches groß sein, demnach muß

1. Das Übergewicht p groß sein; für kleine Winkel ist der Ausschlag dem Übergewicht proportional.

2. Die Länge l des Wagbalkens muß möglichst groß sein; den Wagbalken lang zu machen hat aber seine Nachteile, denn es wird dadurch entweder die Tragfähigkeit geschwächt, oder das Gewicht der Wage vergrößert; letzteres ist aber ein Nachteil, denn

3. Es muß das Gewicht Q der Wage möglichst klein sein. Man verringert das Gewicht des Balkens dadurch, daß man ihn

rautenförmig und durchbrochen macht. Bei kleinem und gleichem Ausschlag ist das Übergewicht dem Gewichte der Wage proportional und man bezeichnet deshalb das Verhältnis des Übergewichtes, das den kleinsten sichtbaren Ausschlag hervorbringt, zum Gewicht der Wage als Empfindlichkeit. Wenn man also sagt, die Empfindlichkeit einer Wage beträgt ein Zehntausendstel, so heißt das, ein Zehntausendstel vom Gewicht der Wage gibt als Übergewicht einen eben deutlich erkennbaren Ausschlag; also etwa 1 dg bei 1 kg Wagengewicht. Häufig bezeichnet man die absolute Größe dieses Übergewichtes als Empfindlichkeit, und sagt, diese Wage hat eine Empfindlichkeit von 1 dg, d. h. sie gibt einen Ausschlag von 1 dg Übergewicht auf unbelasteter Wage. Ist die Wage belastet,

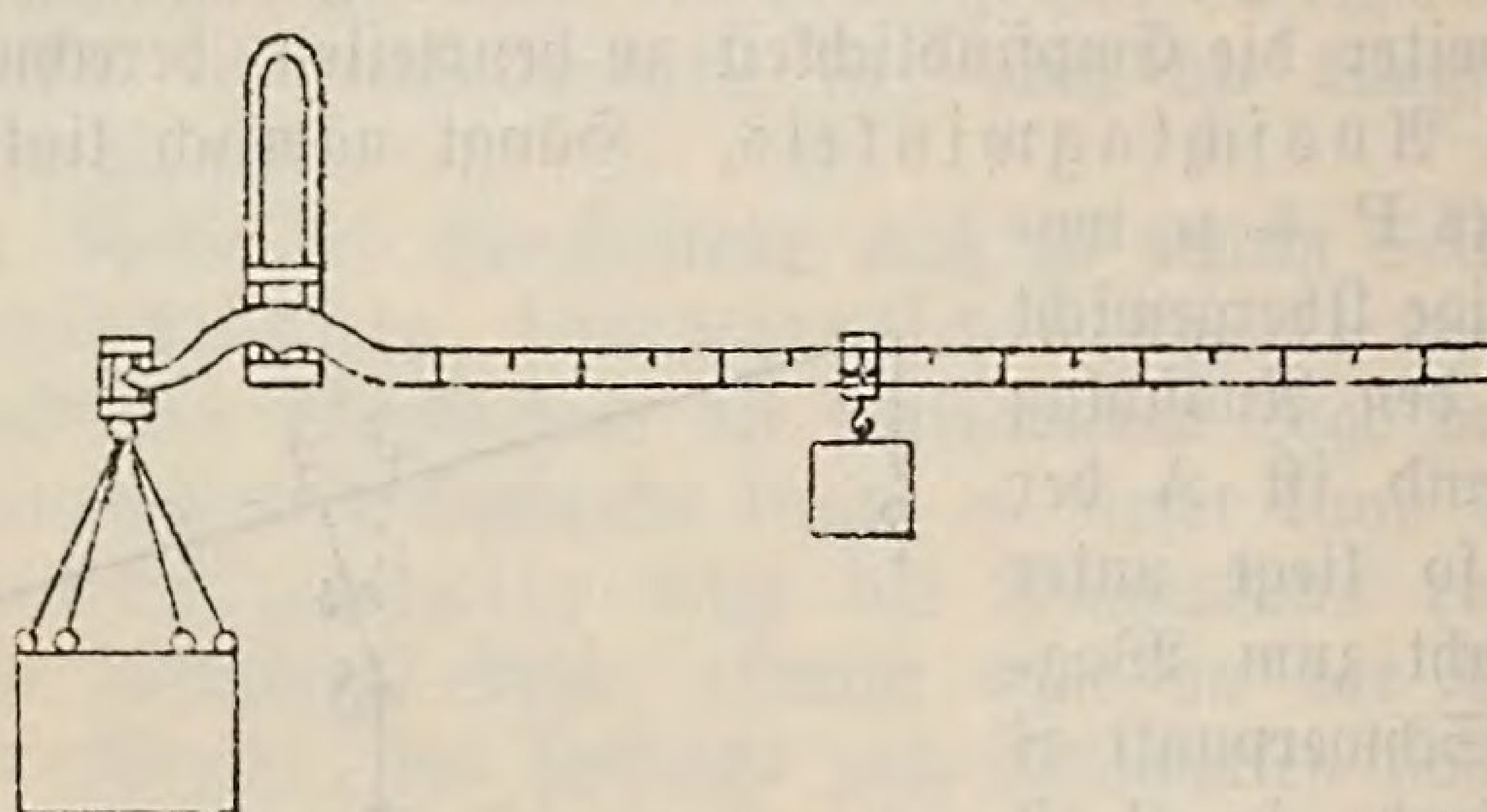


Fig. 314.

so ändert sich die relative Empfindlichkeit nicht, d. h. das Übergewicht muß immer noch ein Zehntausendstel vom Gewicht der Wage betragen; da aber zum Gewicht der Wage nun auch das Gewicht der Belastung dazu gehört, so ist die absolute Empfindlichkeit jetzt viel größer; z. B. bei 5 kg Belastung beiderseits ist das Gewicht der Wage $5+5+1=11$ kg, und hiezu sind nun 11 dg erforderlich, um den ersten Ausschlag zu geben.

4. Es muß SA, die Entfernung des Schwerpunktes vom Stützpunkt, möglichst klein sein. Dafür kann der Mechaniker sorgen und so die Empfindlichkeit bei feinen physikalischen und chemischen Wagen ungemein erhöhen. Bei Krämerwagen ist übergroße Empfindlichkeit nicht vorteilhaft, weil die zu empfindliche Wage schon bei kleinen Übergewichten ganz herabsinkt, und nicht aus der Größe des Ausschlages die Größe des Zuviel abzuschätzen erlaubt. Über Genauigkeits- und Empfindlichkeitsgrenzen der Krämerwagen sind gesetzliche Vorschriften vorhanden.

252. Andere Arten von Wagen.

Die Decimalwage: Der eine Wagbalken ist 10 mal kürzer als der andere; an den kürzeren Arm wird die Last gehängt, an

den längeren das Gewicht; letzteres darf also 10 mal kleiner sein als die Last, was sie zum Wägen sehr schwerer Lasten besonders bequem macht. Empfindlichkeit und Genauigkeit sind meist gering.

Die römische Wage oder Schnellwage (Fig. 314). Die Last hängt an einem kurzen Wagbalken; der andere ist viel länger und auf ihm sind Teilstriche eingraviert, deren Entfernung gleich der Länge des kurzen Hebelarmes ist. An diesem Hebelarme ist nur ein Gewicht aufgehängt und längs desselben verschiebbar (Laufgewicht), und man schließt aus der Länge des Hebelarmes, an dem das Laufgewicht hängt, auf die Größe des Gewichtes, das am anderen Hebelarme hängt, z. B. 1 ℔ Laufgewicht am Teilstrich 6 (Hebelarm 6) = 6 ℔ in der Schale (Hebelarm 1) Empfindlichkeit und Genauigkeit sind meist sehr gering; da man aber keinen Gewichtssatz braucht, sondern mit demselben Gewichte beliebige Körper abwägen kann, so ist sie besonders für Markt- und Hausierhandel sehr bequem.

Die Zeigerwage: Auf den einen Arm wird die Last gelegt, der andere fehlt, Gewichte werden nicht aufgelegt; auf einem nach abwärts führenden Stift ist eine schwere Kugel angebracht, die durch Auflegen der Last nach auswärts gedreht wird um so weiter, je größer die Last ist; an einem Zeiger kann man die Größe der Drehung ersehen und ungefähr auf das Gewicht schließen. Zum wirklichen Wägen ist sie in dieser Form nicht brauchbar, doch wird sie, etwa auf der Post, dazu benützt, um zu sehen, ob das Gewicht eines Briefes ein vorgeschriebenes Maß übersteigt oder nicht.

Die Federwage: Sie besteht aus einer starken, elastischen Spiralfeder; auf sie ist oben eine Stange aufgesetzt, die auf die Spiralfeder drückt; die Stange geht durch eine Führung, damit sie nicht umkippt, und trägt oben einen Teller zum Auflegen des zu wägenden Körpers. Zudem ist ein Teil dieser Stange gezahnt und greift in einen Trieb, auf dessen Achse ein Zeiger befestigt ist. Je mehr Gewichte man auf den Teller legt, um so tiefer wird die Stange herabgedrückt, um so mehr dreht sie den Trieb und damit den Zeiger, der vor einem geteilten Kreise spielt. Auf diesem geteilten Kreise sind die Gewichte angegeben, welche den Zeigerständen entsprechen; die Kreisteilung findet man durch Auflegung bestimmter Gewichte. Genauigkeit und Empfindlichkeit sind meist sehr gering, jedoch werden diese Wagen in der Küche häufig angewandt.

253. Die Brückenwage.

Die Brückenwage ist meistens zugleich Decimalwage; sie unterscheidet sich von der zweiarmigen Wage wesentlich dadurch, daß die Last nicht bloß auf einem Punkte, sondern auf 2 (sogar 3) Punkten (Schneiden) ruht. Am einen Arme AD hängt die

Wagschale für die Gewichte; am anderen Arme AB hängt an einem 10mal kleinern Arme eine Stange BE nach abwärts; sie hat unten eine Krümmung, in welcher mittels einer Schneide eine Stange hängt, die horizontal verläuft und sich gabelt. Auf dieser Gabelung sind Bretter befestigt, Brücke genannt, auf welche die Last gelegt wird. Am anderen Ende stützt sich die Stange mittels Schneiden auf einen Hebel im Punkte J; dieser Hebel ist hinten auf eine Schneide F gestützt und hängt am vordern Ende mit der Schneide G in dem gekrümmten Ende einer Stange GC, die mit dem andern oberen Ende C am Wagbalken AC hängt. Dabei ist noch notwendig, daß der Hebel FG in demselben Verhältnis

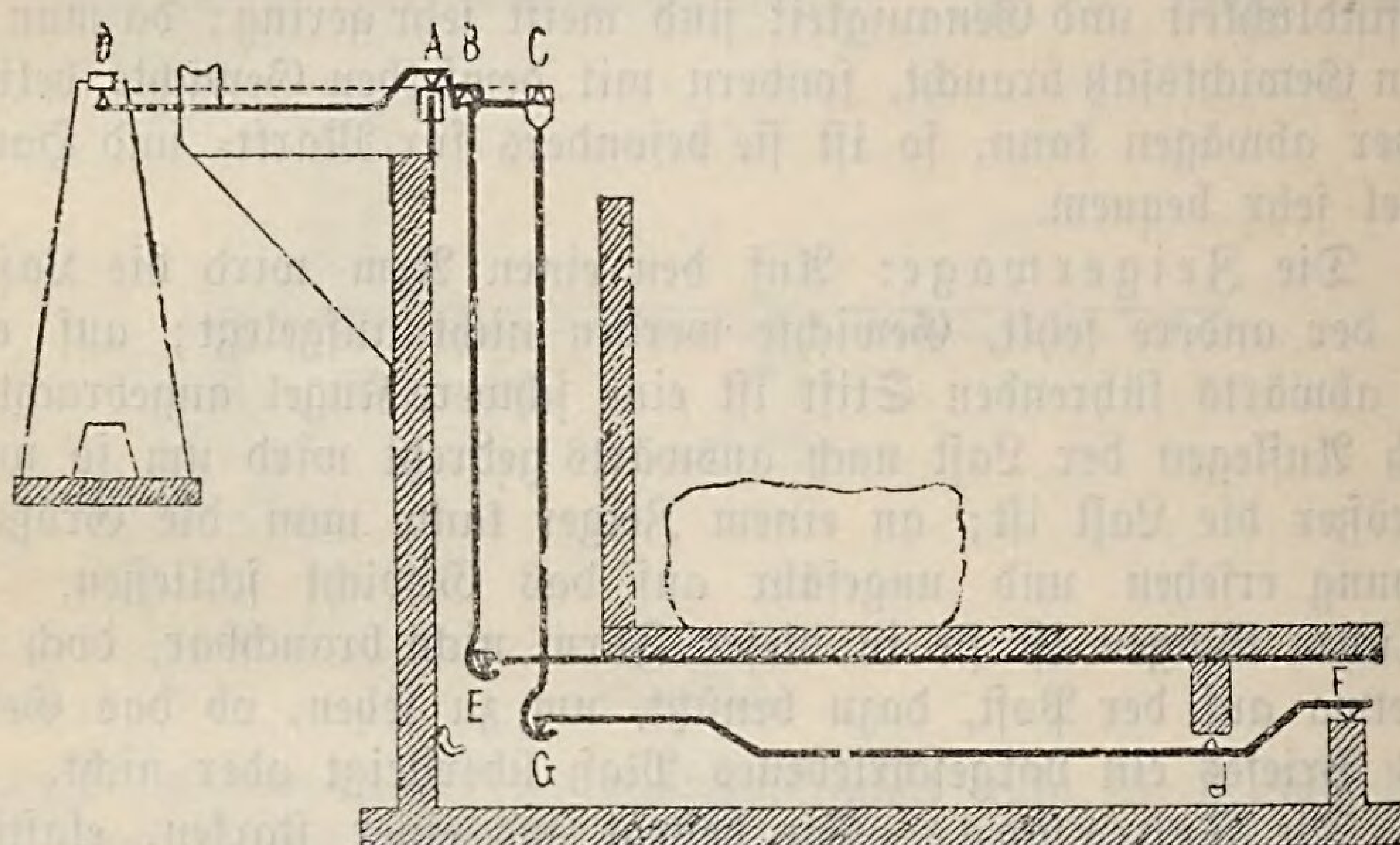


Fig. 315.

geteilt ist wie AC, also daß FJ : FG = AB : AC, also etwa $JF = {}^1/_6\, GF$, $AB = {}^1/_6\, AC$. Man kann zunächst zeigen, daß wenn die Last auf der Brücke liegt, es gerade so ist, als hinge sie in B. Denn es sei die Last etwa = Q (100 *kg*), so verteilt sie sich auf die beiden Stützpunkte E und J der Brücke nach dem Hebelgesetze, also umgekehrt proportional den Entfernungen; es treffen etwa x *kg* (40 *kg*) auf E, y *kg* (60 *kg*) auf J; die x *kg* hängen mittels der Stange EB direkt an B. Die y *kg* (60 *kg*) in J drücken den Hebel am Arme JF, und bewirken, daß G mit einer Kraft z niedergedrückt wird, so daß z : y = FJ : FG, also $z = y \cdot \frac{FJ}{FG}$ ($z = 60 \cdot {}^1/_6\; 10$ *kg*). Diese z *kg* hängen mittels der Stange GC am Wagbalken AC, bringen also an ihm dasselbe Moment hervor, wie wenn in B eine Kraft v hinge, für welche $v : z = AC : AB$, also $v = z \cdot \frac{AC}{BC}$ ($v = 10 \cdot {}^6/_1 = 60$); setzt man obigen Wert von z in diese Gleichung ein, so ist

$$v = y \frac{FJ \cdot AC}{FG \cdot AB}, \text{ also } v = y, \text{ da } FJ \,.\, AC = FG \,.\, AB$$

laut der ersten Bedingung. In B wirken also die zwei Kräfte x und y (40 *kg* u. 60 *kg*), deren Summe wieder = Q (100 *kg*) ist. Q kann also gewogen werden durch ein 10 mal kleineres Gewicht in D.

Aus der Ableitung ist zugleich ersichtlich, daß es gleichgültig ist, auf welchem Punkte der Brücke die Last liegt.

Bei Drehungen des Wagbalkens bleibt die Brücke horizontal, und macht 10 mal kleinere Schwingungen als D. Dies ist für das Wägen leicht beweglicher Sachen, Flüssigkeiten, Wagen, lebenden Viehes von Vorteil. Bei Prüfung der Wage untersucht man inbesondere auch, ob es gleichgiltig ist, auf welchen Punkt der Brücke man die Last legt, denn davon hängt besonders die Genauigkeit der Wage ab, und es ist dies eine Probe dafür, ob die Hebel GF und CA genau im gleichen Verhältnisse geteilt sind.

254. Die Tellerwage.

Die Tellerwage hat ähnliche Einrichtung wie die Brückenwage. Der Wagbalken ist in der Mitte S gestützt, und trägt an den Enden Stahlschneiden, die nach oben gerichtet sind, und auf beiden Seiten des Wagbalkens befindet sich dieselbe Einrichtung, nämlich folgende:

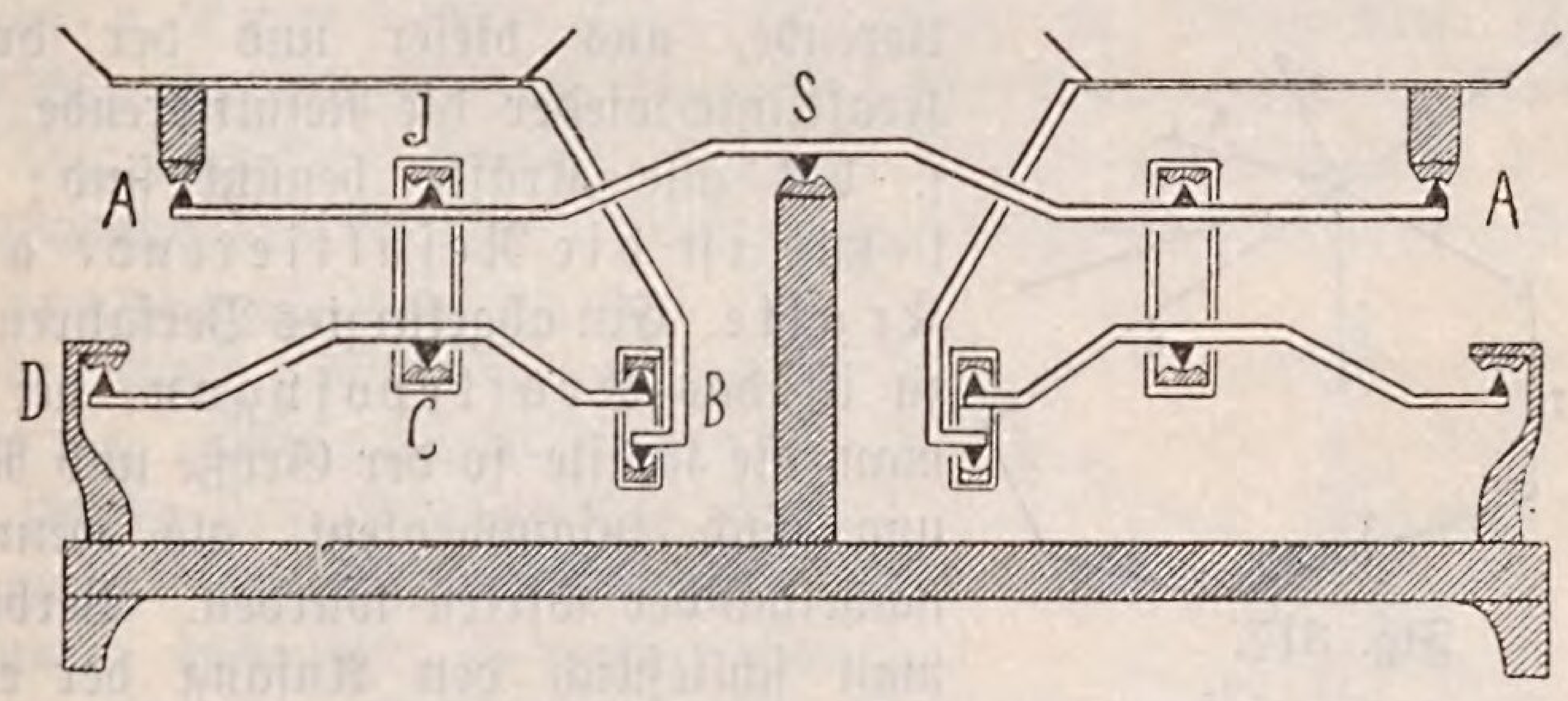


Fig. 316.

Auf der Stahlschneide A sitzt der Teller oder eine Platte mit dem einen Ende, am andern Ende (gegen die Mitte zu gerichtet) befindet sich am Teller ein nach abwärts gehender Fortsatz, dieser drückt im Punkte B auf das Ende des Hebels DB, der in D unterstützt ist und in C durch einen Haken mit der Schneide J des Wagbalkens verbunden ist. Dabei ist wieder notwendig, daß der Hebel SA durch J ebenso geteilt sei, wie DB durch C, also daß SJ : SA = DC : DB, etwa = 3 : 5. Liegt nun die Last an irdend einer Stelle des Tellers, so ist es gerade so, als läge sie

auf der Schneide A. Denn es sei die Last etwa = 20 ℔, und sie verteile sich so, daß auf A etwa 11 ℔, auf B also 9 ℔ treffen, so bringen diese 9 ℔ in B einen Druck in C von $^5/_3 \cdot 9 = 15$ ℔ hervor, da C mit J verbunden ist, so wirken diese 15 ℔ in J und bringen deshalb in A einen Druck von $^3/_5 \cdot 15 = 9$ ℔ hervor; diese 9 ℔ kommen zu den in A schon vorhandenen 11 ℔, gibt 20 ℔; die auf dem Teller liegende Last wirkt demnach gerade so, als wenn sie auf der Schneide A selbst läge. (Allgemeine Ableitung wie in 253.)

Es ist wieder leicht zu sehen, daß es gleichgültig ist, auf welchen Teil des Tellers die Last gelegt wird (Probe für die Genauigkeit der Wage), sowie daß, wenn der Wagbalken sich dreht, der Teller horizontal bleibt. Der Wagbalken ist ein doppelter, bestehend aus zwei parallelen, spanneweit von einander entfernten, durch Querstäbe mit einander verbundenen Balken; man hat also am Ende zwei Schneiden A, auf denen der Teller ruht; dadurch wird ein Umkippen des Tellers vermieden.

255. Kräftepolygon.

Wirken zwei Kräfte unter einem Winkel auf einen Punkt, so findet man die Resultierende als Diagonale des aus beiden Kraftlinien gebildeten Kräfteparallelogramms. Wirken drei oder mehrere Kräfte auf den Punkt, so sucht man aus zwei Kraftlinien die Resultierende, aus dieser und der dritten Kraftlinie wieder die Resultierende u. s. f. bis alle Kräfte benützt sind; die letzte ist die Resultierende aller Kräfte. Ein abgekürztes Verfahren hiezu ist das Kräftepolygon, bei dem man die Kräfte so der Größe und Richtung nach zusammensetzt, als wenn sie nacheinander wirken würden. Verbindet man schließlich den Anfang der ersten mit dem Endpunkt der letzten Kraftlinie, so stellt diese Linie dann die Resultierende vor. Es ist leicht zu sehen, daß es hiebei gleichgültig ist, in welcher Reihenfolge die vorhandenen Kräfte benützt werden.

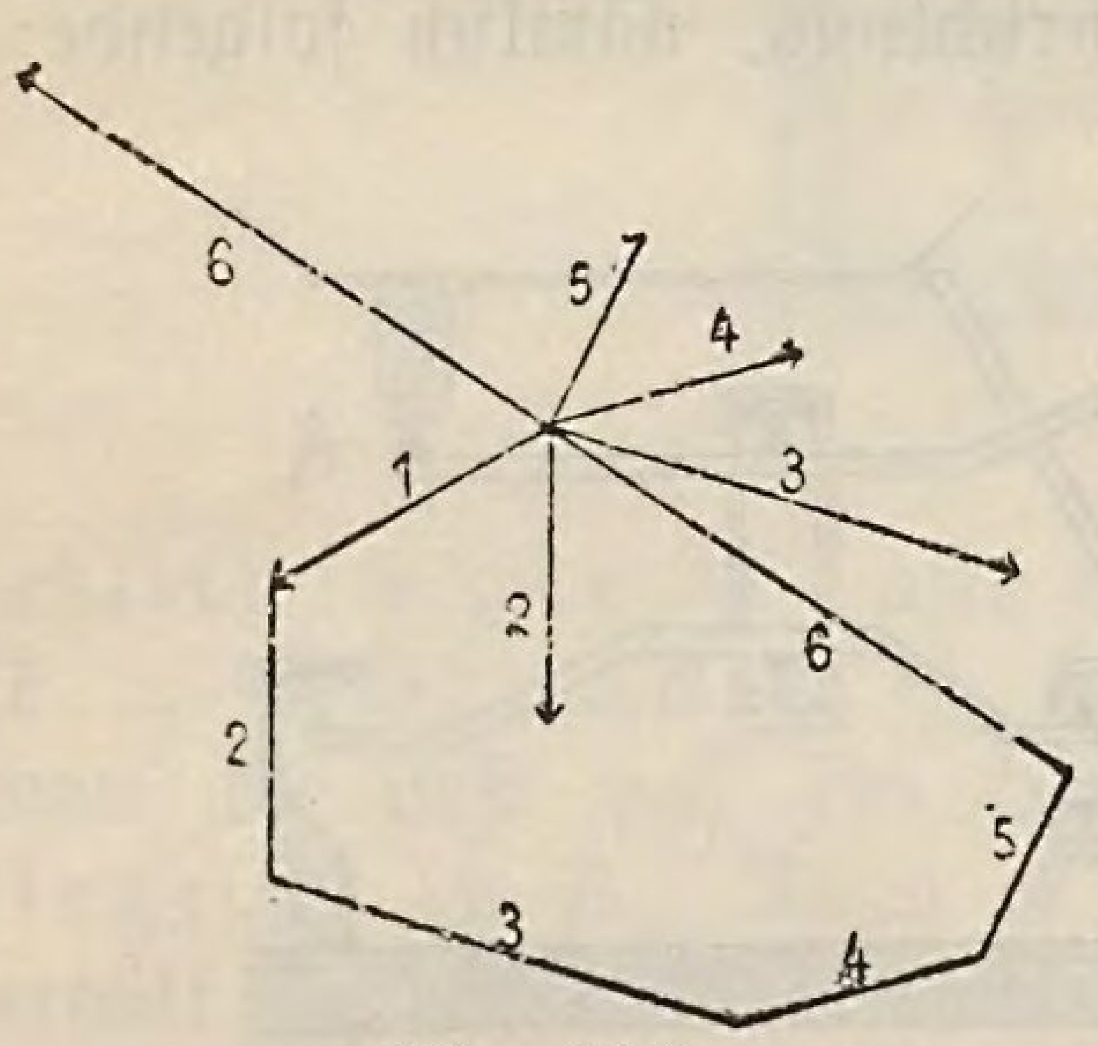


Fig. 317.

Wenn sich hiebei das Polygon schließt, d. h. der Endpunkt der letzten Kraftlinie, mit dem Anfange der ersten zusammenfällt, wie in Fig. 317, so ist die Resultierende = 0, die Kräfte halten sich im Gleichgewichte. Demnach ist es leicht, eine Reihe von Kräften anzugeben, deren Resultierende = 0 ist; zeichnet man nämlich eine beliebige geschlossene Figur, so stellen die Seiten derselben die Größe und Richtung der verlangten Kräfte dar.

An dieser Stelle mag über die Tagentenbussole Folgendes nachgeholt werden. Der Erdmagnetismus wirkt auf die Nadel wie eine Kraft M, welche an der Spitze der Nadel in der Richtung des magnetischen Meridians wirkt. Der über die Nadel in der Richtung des magnetischen Meridians geleitete Strom wirkt wie eine Kraft J, welche an der Spitze der Nadel senkrecht zur Stromrichtung, also senkrecht zur magnetischen Kraft angreift. Die Nadel kommt nur dann zur Ruhe, wenn sie in der Richtung der Resultierenden des aus beiden Kräften J und M gebildeten Parallelogramms steht. Bezeichnet a den Ablenkungswinkel, so ist $\frac{J}{M} = \operatorname{tg} a$; irgend ein anderer Strom von der Stärke J′ lenkt dieselbe Nadel um a'^0 ab, also ist $\frac{J'}{M} = \operatorname{tg} a'$, hieraus $J : J' = \operatorname{tg} a : a'$; d. h. die Intensitäten zweier Ströme verhalten sich wie die Tangenten der Ablenkungswinkel.

256. Schiefe Ebene.

Wirkt eine Kraft auf einen Körper in einer Richtung, in der sich der Körper nicht bewegen kann, so zerlegt sich die Kraft in zwei Seitenkräfte (Komponenten); die eine derselben wirkt in der Richtung, in der sich der Körper bewegen kann, die andere wirkt senkrecht dazu. Dies ist der Fall, wenn ein Körper auf einer *schiefen Ebene* liegt: auf ihn wirkt die Schwerkraft Q, sein Gewicht; sie zerlegt sich in die *zwei Komponenten*: P *parallel der schiefen Ebene*, und D *senkrecht zu ihr*; die erste Komponente bewirkt eine *Bewegung längs der schiefen Ebene*, *Bewegungskomponente*, die zweite einen *Druck auf die Ebene*, *Druckkomponente*. Die Größe der Komponenten findet man durch des Kräfteparallelogramm, das mit KJ = Q als Diagonale zu konstruieren ist. Man bezeichnet AB mit l (Länge der schiefen Ebene), BC mit h (Höhe), AC mit b (Basis), so ist △ JKL ∼ △ ABC also

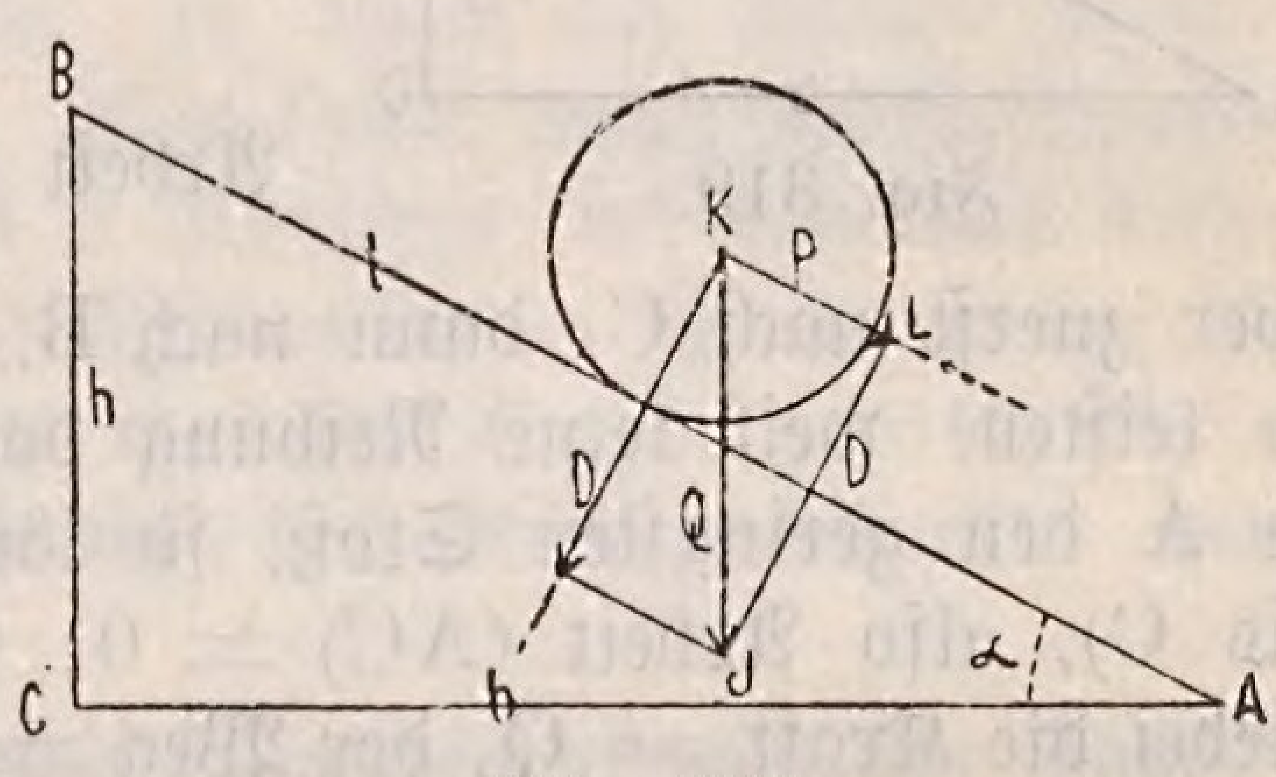


Fig. 318.

$$P : Q = BC : AB = h : l,$$

d. h. **es verhält sich die parallel der schiefen Ebene wirkende Komponente zur Last wie die Höhe der schiefen Ebene zur Länge;** auch ist $\frac{P}{Q} = \frac{h}{l} = \sin a$; $P = Q \sin a$. Ferner: $D : Q = AC : AB = b : l$, d. h. **der Druck verhält sich zur Last wie die Basis zur Länge,** oder

$$\frac{D}{Q} = \frac{b}{l} = \cos \alpha;\ D = Q \cos \alpha.$$

Will man den Körper auf der schiefen Ebene ruhig erhalten, so muß man eine der Kraft P gleiche Kraft in entgegengesetzter Richtung, also parallel der schiefen Ebene nach aufwärts anbringen. Diese Kraft wächst mit der Steigung. Ist die Steigung gering, wie bei Straßen, wo sie nur selten 8⁰/₀ erreicht (d. h. so groß ist, daß BC : AC = 8 : 100), so kann man, ohne einen nennenswerten Fehler zu begehen, statt AB auch AC setzen; dann ist $\frac{P}{Q} = \frac{BC}{AB} = \frac{BC}{AC} = \frac{8}{100}$, also $P = \frac{8}{100}$ Q. Zur Überwindung der Steigung von $4^0/_0$ ist demnach bei einem Wagen von 70 Ztr. = 3500 *kg* Gewicht eine Kraft erforderlich von $\frac{4}{100} \cdot 3500$ *kg* = 140 *kg*.

Je weniger die schiefe Ebene geneigt ist, desto geringer ist die erforderliche Kraft P; aber die Arbeit, die man aufwenden muß, um einen Körper mittels der schiefen Ebene auf eine gewisse Höhe zu bringen, ist stets dieselbe, ob die schiefe Ebene schwach oder stark geneigt ist. Dies beweist man folgendermaßen:

Wir nehmen an, es sei keine Reibung vorhanden: Ich soll den Körper vom Gewichte Q von A und B schaffen, so daß er um h Meter höher liegt; schaffe ich ihn direkt von A nach B, so ist die erforderliche Kraft $P = Q\frac{h}{l}$, der Weg = l; also ist die Arbeit $= Q\frac{h}{l} \cdot l = Q \cdot h$. Schaffe ich ihn aber zuerst nach C, dann nach B, so ist von A nach C keine Arbeit zu leisten, weil keine Reibung vorhanden ist (gebe ich dem Körper in A den geringsten Stoß, so läuft er nach dem Beharrungsgesetze bis C), also Arbeit (AC) = 0; hebe ich ihn von C nach B, so ist hiebei die Kraft = Q, der Weg = h, also die Arbeit (CB) = Q · h; demnach ist die Arbeit von A nach B stets dieselbe, auf welchem Wege ich sie auch leiste.

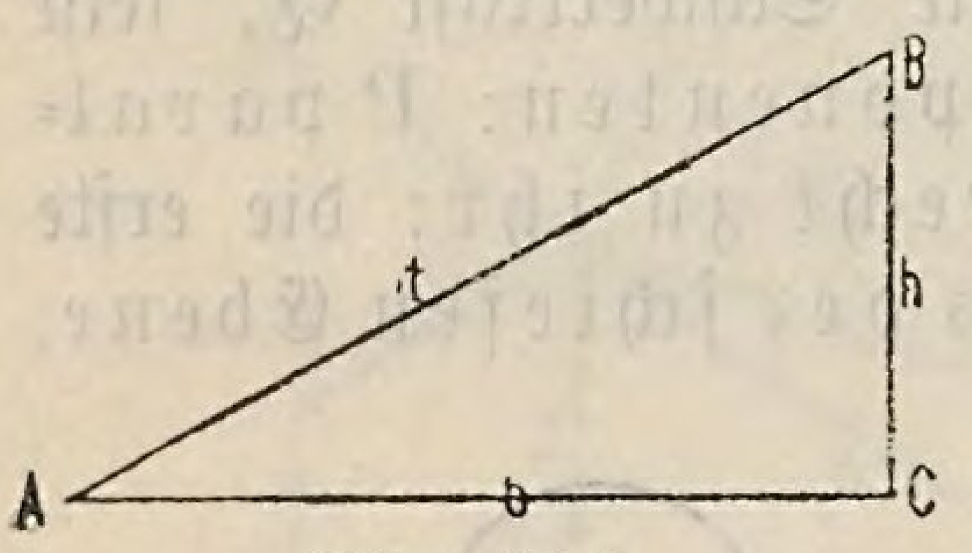


Fig. 319.

Dasselbe läßt sich auch beweisen, wenn Reibung vorhanden ist. Die Reibung ist anzusehen als eine Kraft, die der Richtung der Bewegung entgegengesetzt ist, sie ist abhängig auch vom Drucke und demselben proportional. Man nennt das Verhältnis der Reibung zum Druck den Reibungskoeffizienten; er beträgt für einen Wagen, der sich auf einer gewöhnlichen Landstraße bewegt ca. $^1/_7$, so daß zum Bewegen eines Wagens von

24 Ztr. = 1200 *kg* Gewicht eine Kraft von $^1/_7 \cdot 1200 = 170$ *kg* notwendig ist. Es werde nun ebenso die Last Q längs der schiefen Ebene von A nach B bewegt, und der Reibungskoeffizient sei $= c$, so ist der Druck auf die schiefe Ebene $= Q \cdot \frac{b}{l}$, also die Reibung $= c \cdot \frac{Q \cdot b}{l}$; dazu kommt die Komponente $P = \frac{Qh}{l}$; also ist die Gesamtkraft, die zur Bewegung erforderlich ist $= c\frac{Qb}{l} + Q\frac{h}{l}$; da der Weg $= l$, so ist die Arbeit (AB)

$$= \left(c\frac{Qb}{l} + \frac{Qh}{l}\right) \cdot l = cQb + Qh.$$

Wird nun der Körper von A nach C und dann nach B bewegt, so ist von A nach C die Reibung zu überwinden $= cQ$, der Weg $= b$, also Arbeit (AC) $= cQb$; dann ist die Last Q über die Höhe h zu heben; also Arbeit (CB) $= Qh$, man sieht, daß die Summe beider Arbeiten gleich der von A nach B ist.

Liegt ein Körper auf einer schiefen Ebene, so wirkt die Komponente P der Schwerkraft parallel der schiefen Ebene nach abwärts, die Reibung wirkt, wenn der Körper sich nach abwärts bewegen soll, dieser Kraft entgegen. Ist diese Komponente kleiner als die Reibung, so bleibt der Körper auf der schiefen Ebene liegen, und zur Bewegung nach abwärts muß noch eine Kraft $= cQ \cos \alpha - Q \sin \alpha$ angebracht werden (nach aufwärts eine Kraft $cQ \cos \alpha + Q \sin \alpha$). Ist die Komponente der Schwerkraft größer als die Reibung, so bewegt sich der Körper nach abwärts mit der Kraft $Q \sin \alpha - cQ \cos \alpha$. Ist die Komponente = der Reibung, so bleibt der Körper gerade noch auf der schiefen Ebene liegen. Man kann, wenn der Reibungskoeffizient c bekannt ist, den Winkel α berechnen, bei dem das stattfindet und zwar aus der Gleichung $cQ \cos \alpha - Q \sin \alpha = 0$; also $\operatorname{tg} \alpha = c$; diesen Winkel nennt man den Reibungswinkel; umgekehrt kann man aus der Größe des Reibungswinkels den Reibungskoeffizienten berechnen.

Man erkennt leicht die Richtigkeit folgenden allgemeinen Satzes: Ist ein Körper auf einer schiefen Ebene, und wirken auf ihn eine Anzahl beliebiger Kräfte in verschiedenen Richtungen, so bleibt der Körper in Ruhe, wenn die Resultierende sämtlicher Kräfte senkrecht steht auf der schiefen Ebene und gegen sie gerichtet ist. Aus diesem allgemeinen Satze hätten wir den schon besprochenen Fall ableiten können, wenn eine Kraft parallel der schiefen Ebene wirkt.

Wir betrachten nun den Fall, wenn eine Kraft angebracht werden soll, die parallel der Basis wirkt (Fig. 320). Auf den

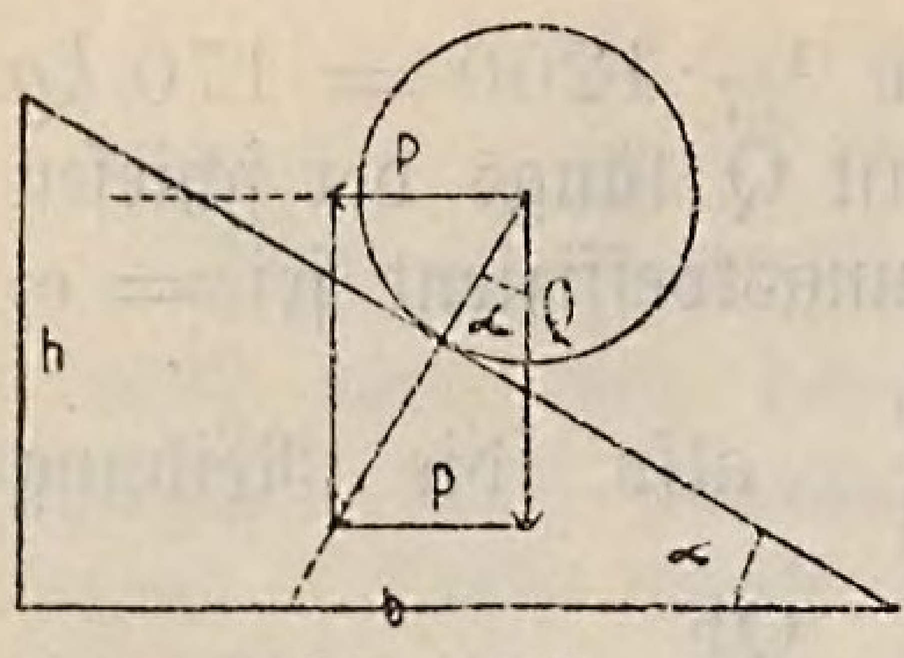


Fig. 320.

Körper wirken zwei Kräfte, die Schwerkraft Q und die Kraft P, parallel der Basis; ihre Resultierende muß senkrecht stehen zur schiefen Ebene. Man kann also das Kräfteparallelogramm zeichnen und findet dadurch die Größe von $P = Q \operatorname{tg} \alpha = \frac{Qh}{b}$, oder $P:Q = h:b$; **Kraft verhält sich zur Last, wie Höhe zur Basis.**

Liegt die Last auf der schiefen Ebene und ich halte sie mittels eines Strickes, dem ich verschiedene Richtung geben kann, so finde ich die Größe der erforderlichen Kräfte durch Zeichnung der Kräfteparallelogramme, deren Diagonale senkrecht zur schiefen Ebene steht.

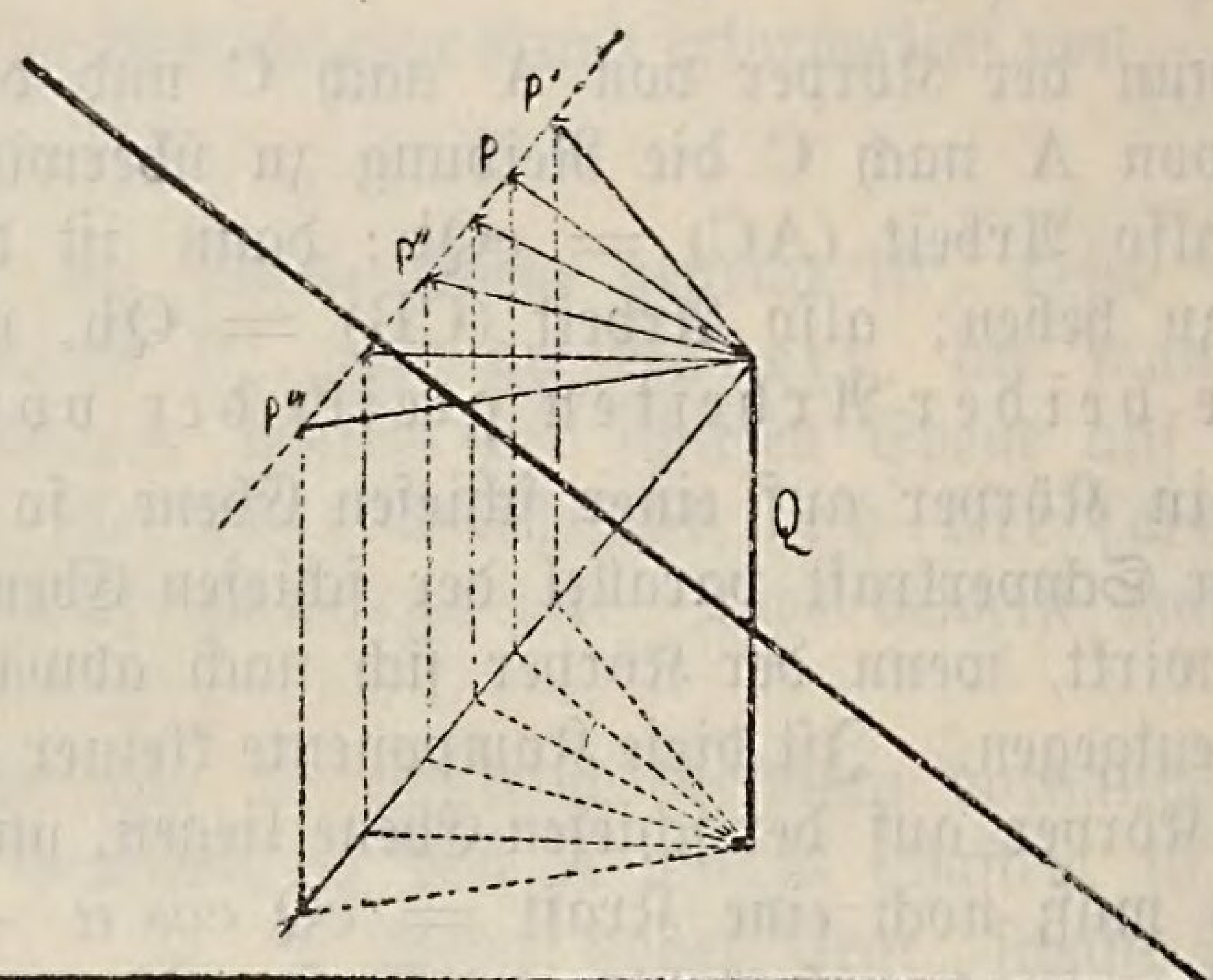


Fig. 321.

Man erkennt leicht (Fig. 321), daß unter diesen Kräften P, P′, P″ .... diejenige die kleinste ist, die # der Ebene wirkt, also die bekannte Komponente $P = Q \sin \alpha$.

257. Die Kniehebelpresse.

Die Kniehebelpresse besteht erstens aus dem Gerüst, bestehend aus zwei starken Platten oben und unten, die durch starke Stäbe miteinander verbunden sind, zweitens aus dem Knie: dies wird gebildet aus zwei starken Stäben, die unter sehr großem, nahezu gestrecktem Winkel zusammenstoßen; von diesen Stäben ist das Ende des oberen von der oberen Platte etwas entfernt, so daß zwischen ihn und die Platte der zu pressende Körper gelegt werden kann.

Übt man nun auf das Knie eine Kraft Q aus in einer solchen Richtung, daß sie den Winkel des Knies in einen gestreckten zu verwandeln sucht, so zerlegt sich diese Kraft in die zwei Seitenkräfte P und P, die in den Richtungen der Kniestangen wirken; von diesen drückt die nach aufwärts gehende den zu pressenden Körper. Dabei ist P größer als Q, man hat also einen Kraftgewinn, der

offenbar um so größer ist, je flacher das Knie ist, je näher sein Winkel an 180° liegt.

Macht man diesen Winkel sehr nahe an 180°, so ist P vielmal größer als Q, leicht 20 bis 100 mal größer, man kann also einen bedeutenden Druck P ausüben mittels einer kleinen Kraft Q (Kniepresse).

Um die Kraft Q besser und größer hervorbringen zu können, drückt man nicht direkt auf das Knie, sondern auf das lange Ende eines Druckhebels, der mit dem kurzen Arme auf das Knie drückt (Kniehebelpresse). Dadurch wird der Kraftgewinn noch so vielmal größer, als der Kraftgewinn des Druckhebels beträgt (etwa 10 mal); das gibt also bei flachem Knie einen 200—1000 fachen Kraftgewinn.

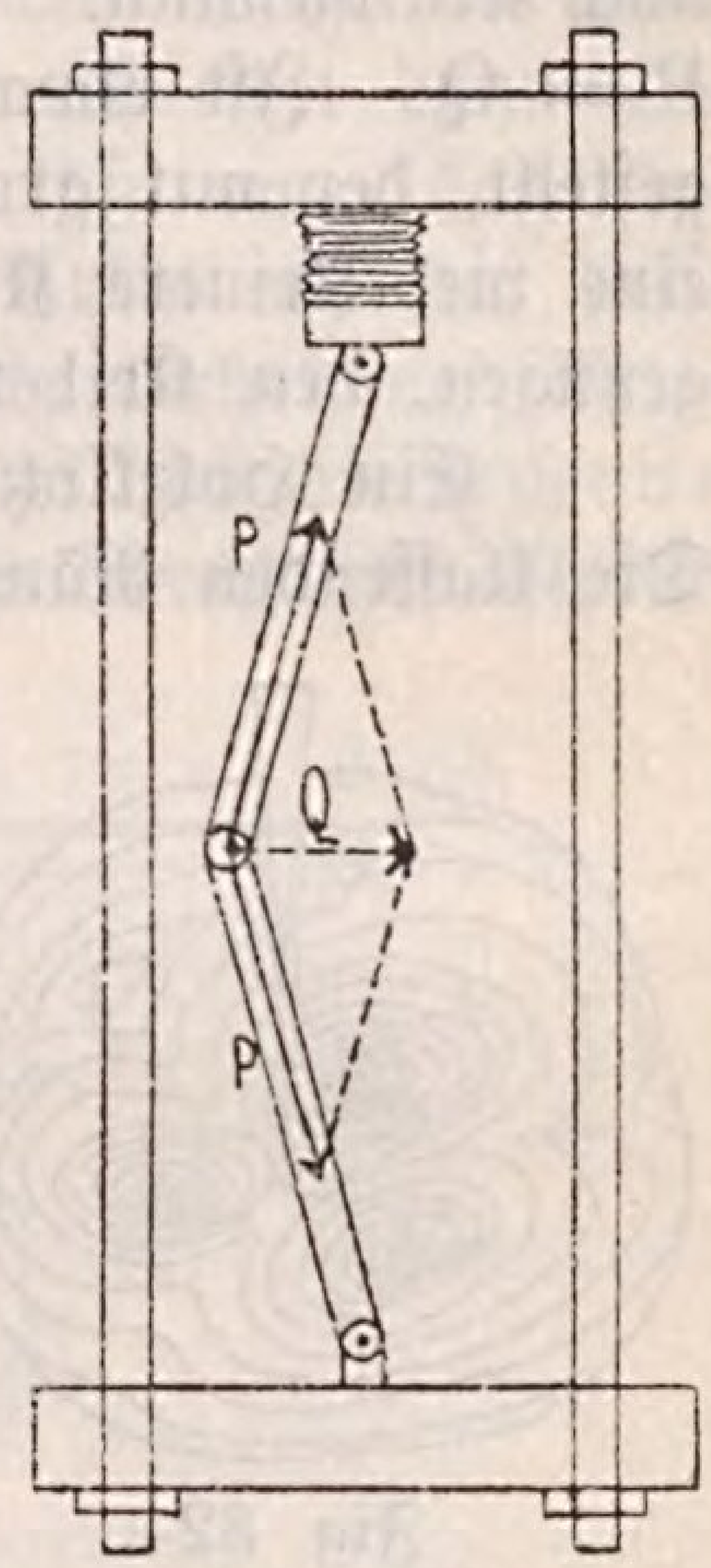


Fig. 322.

Man benützt solche Maschinen zum Prägen von Münzen; von beiden Seiten der Münze werden negative Formen in Stahl geschnitten, die eine wird auf der Gerüstplatte, die andere am Ende der Kniestange angebracht, und zwischen sie wird das zu prägende Metallstück gelegt; durch den starken Druck der Presse wird das verhältnismäßig weiche Metall des Geldstückes in die Vertiefungen der Prägstöcke gepreßt und so die Münze geprägt. Ebenso wird sie benützt zum Stanzen von Blechen (Herausschlagen von Löchern aus einem Bleche), zum Pressen von Blechen und ähnlichem.

258. Der Keil.

Der Keil ist ein dreiseitiges Prisma, von dem 2 Seitenflächen unter sehr kleinem Winkel zusammenstoßen; diese zwei Seitenflächen nennt man die Seiten, sie sind im Querschnitt gleich lang; die dritte Fläche heißt der Rücken des Keiles.

Ist der Keil zwischen zwei etwas von einander entfernte Gegenstände geschoben, die dem weiteren Eindringen einen großen Widerstand entgegensetzen, und übt man nun durch Schläge auf den Rücken des Keiles eine Kraft Q aus, so zerlegt sich dieselbe nach dem Kräfteparallelogramm in zwei Seitenkräfte P und P, welche senkrecht stehen zu den Seiten des Keiles. Aus der Ähnlichkeit der Dreiecke ist leicht zu sehen, daß die Kraft P sich zum Drucke Q verhält wie die Seite des Keiles zum Rücken. Da diese Seitenkräfte P

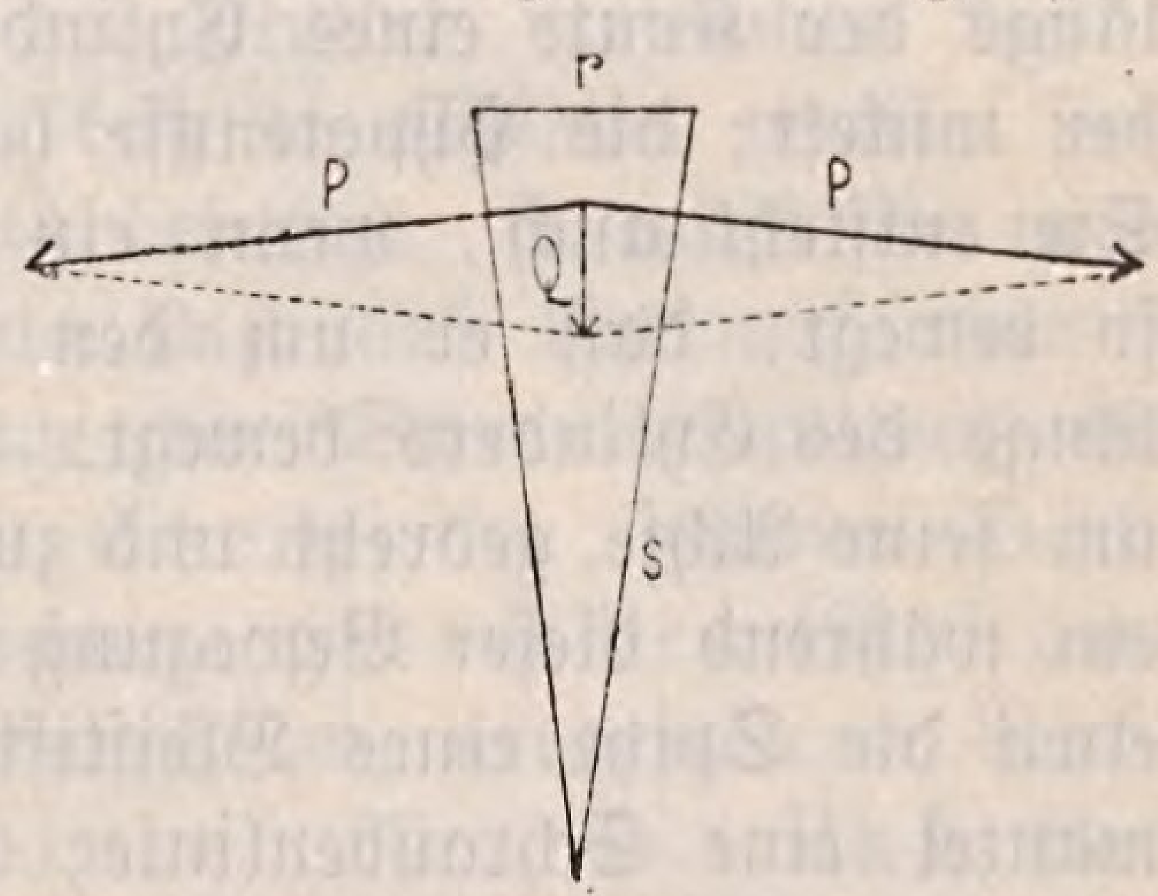


Fig. 323.

bei kleinem Winkel vielmal größer sind als Q, so sind sie wohl imstande, einen großen Widerstand zu überwinden. Der Keil liefert also auch Kraftgewinn. Ist der Winkel des Keiles = 60°, so ist jede Kraft P = Q. Ist etwa der Keil unter den Fuß eines schweren Tisches gestellt, der mit großer Kraft (P) auf ihn drückt, so genügt schon eine viel kleinere Kraft Q, um sie zu überwinden; mäßige Schläge genügen, den Keil weiter hineinzutreiben und so den Tisch zu heben.

Ein Holzklotz wird durch Eintreiben eines Keiles zersprengt. Die klaffenden Ränder des Klotzes werden durch die Festigkeit des Holzes mit großer Kraft zusammengehalten; um diese Kraft zu überwinden, schlägt man den Keil ein, wobei sich die Kraft der Schläge (Q) zerlegt in die viel größeren Kräfte P, welche nun das Holz auseinander reißen. Ein solcher Keil hat meist etwas gekrümmte Flächen, so daß am Anfange, wenn der Keil eingetrieben wird, und die zu überwindende Kraft noch nicht besonders groß ist, der Kraftgewinn auch nicht beträchtlich ist; später aber, wenn der Keil immer tiefer eindringt, und der Widerstand mit der Entfernung der klaffenden Ränder größer wird, befinden sich solche Teile der Keilseiten zwischen den Rändern, deren Winkel sehr klein ist, so daß der Kraftgewinn nun sehr groß ist.

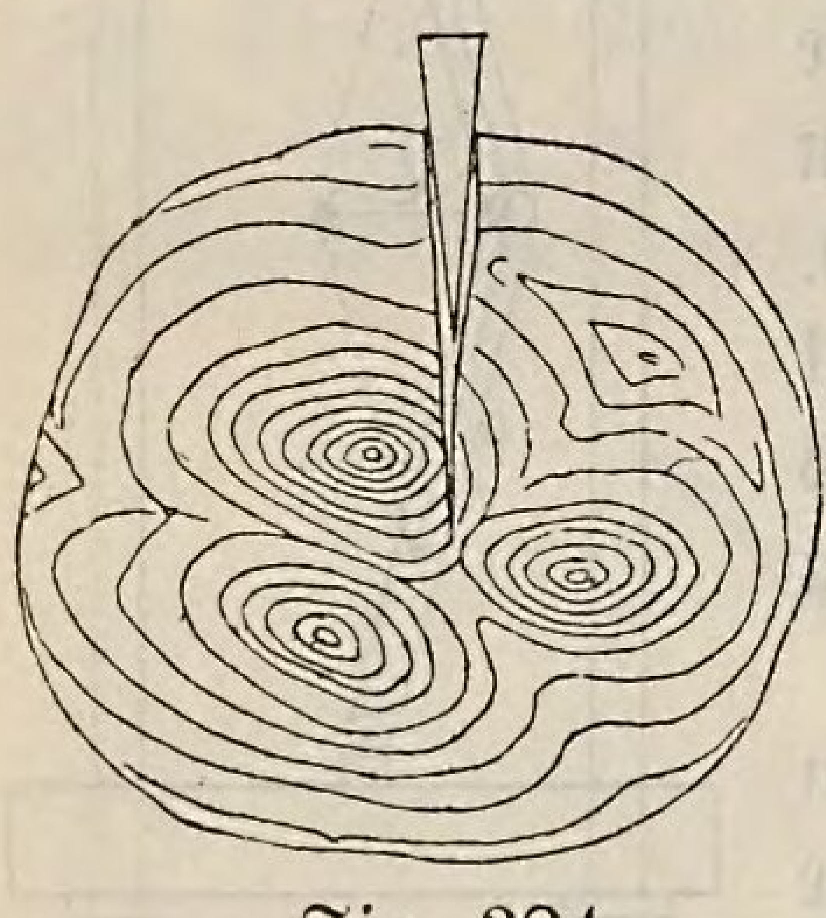


Fig. 324.

Auch zum Befestigen dient der Keil; z. B. man spaltet das eine Ende des hölzernen Stieles eines Hammers, steckt es in das Öhr des Hammers und treibt nun einen Keil aus hartem Holze in den Spalt; dieser drückt die zwei Teile des gespaltenen Stieles sehr stark an die Wände des Öhres und bewirkt so eine starke Befestigung.

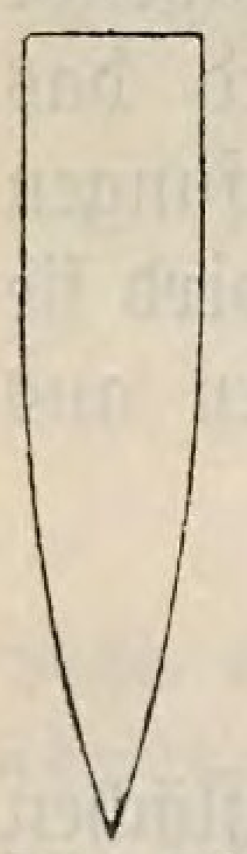


Fig. 325.

259. Die Schraube.

Die Schraubenlinie ist eine doppelt gekrümmte Linie, welche entsteht, wenn man ein rechtwinkliges Dreieck mit einer Kathete längs der Kante eines Cylinders befestigt und nun um den Cylinder wickelt; die Hypotenuse hat dann die Form der Schraubenlinie. Sie entsteht auch, wenn ein Punkt sich auf einem Cylindermantel so bewegt, daß er um den Cylinder herumgeht und zugleich sich längs des Cylinders bewegt. Sie entsteht auch, wenn ein Cylinder um seine Achse gedreht und zugleich längs der Achse verschoben wird; ein während dieser Bewegung des Cylinders ruhig gehaltener Punkt, etwa die Spitze eines Bleistiftes, beschreibt dann auf dem Cylindermantel eine Schraubenlinie; sie entsteht auch, wenn ein Cylinder um seine Achse gedreht wird und ein Punkt sich längs einer Cylinderkante bewegt. Diese letzten Arten benützt der Mechaniker, um eine

Schraubenspindel herzustellen; er setzt einen Cylinder aus Holz oder Metall auf die Drehbank ein und hat nun eine Vorrichtung, durch welche, während der Cylinder um die Achse gedreht wird, die Spitze des Meißels längs des Cylinders fortrückt; sie schneidet dann Vertiefungen ein längs einer Schraubenlinie und läßt eine längs derselben laufende Erhöhung stehen; ein solcher Cylinder, auf dessen Mantel eine längs einer Schraubenlinie laufende Erhöhung sich befindet, heißt Schraubenspindel. Dazu gehört noch die Schraubenmutter, ein Stück Holz oder Metall, das durchbohrt ist, und

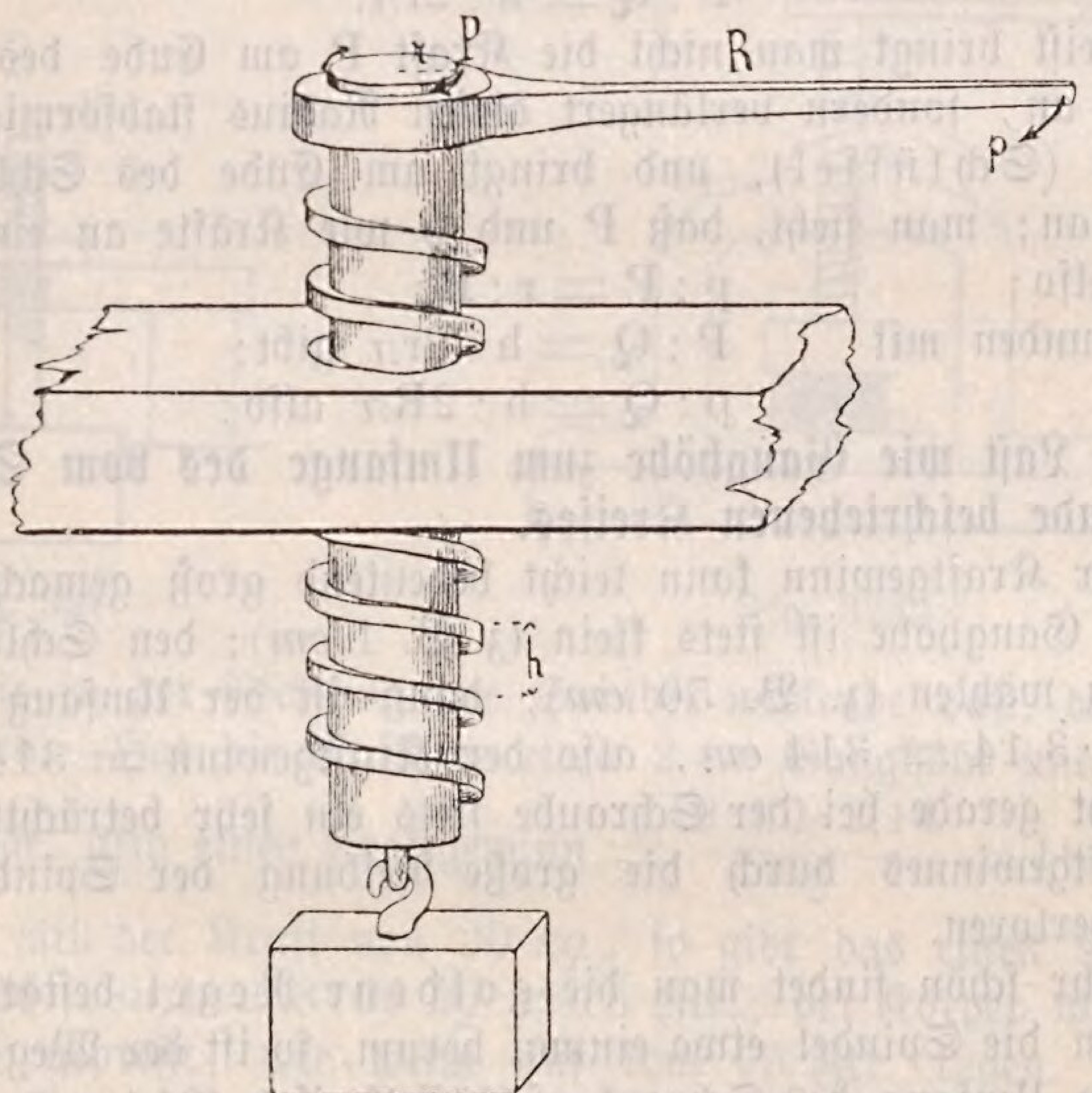


Fig. 326.

in dieser Durchbohrung eine fortlaufende Vertiefung von der Art hat, daß die Erhöhungen der Spindel gerade hineinpassen. Durch Drehen der Spindel oder Mutter kann der Schraubenwulst der Spindel längs der Schraubenvertiefung der Mutter verschoben werden.

Es sei die Mutter so befestigt, daß die Spindel vertikal steht; unten an der Spindel sei die Last Q befestigt, so wirkt sie in der Richtung der Spindel, und ruht als Last auf den nach oben gerichteten Flächen der Schraubengänge der Schraubenmutter; diese stellen aber gleichsam eine schiefe Ebene dar, deren Höhe, wenn wir bloß einen Umgang betrachten, gleich dem Abstande zweier Schraubengänge ist (Ganghöhe), und deren Basis gleich dem Umfange der Spindel ist. Die Last sucht sich nach abwärts zu bewegen, indem sie die Spindel längs der Schraubengänge dreht, und sie bewegt sich wirklich, wenn die

Reibung zwischen Spindel und Mutter nicht zu groß ist. Will man diese Bewegung hindern, also die Schraube ins Gleichgewicht setzen, so muß man die Spindel oben drehen, also eine Kraft P anwenden, die senkrecht zum Radius der Spindel wirkt, die also parallel der Basis der schiefen Ebene wirkt. Man kann sonach die Schraube als schiefe Ebene ansehen, bei der die Last senkrecht zur Basis, die Kraft parallel zur Basis wirkt; **also verhält sich Kraft zur Last wie Höhe zur Basis, also wie Ganghöhe zum Umfang der Spindel;**

$$P : Q = h : 2r\pi.$$

Meist bringt man nicht die Kraft P am Ende des Spindelradius r an, sondern verlängert diesen Radius stabförmig bis zur Länge R (Schlüssel), und bringt am Ende des Schlüssels die Kraft p an; man sieht, daß P und p wie Kräfte an einem Hebel wirken, also: $p : P = r : R$;

dies verbunden mit $P : Q = h : 2r\pi$ gibt:

$p : Q = h : 2R\pi$ also:

Kraft zu Last wie Ganghöhe zum Umfange des vom Schraubenschlüsselende beschriebenen Kreises.

Der Kraftgewinn kann leicht bedeutend groß gemacht werden, denn die Ganghöhe ist stets klein (z. B. 1 *cm*); den Schlüssel kann man lang wählen (z. B. 50 *cm*), dann ist der Umfang $= 2R\pi = 2 \cdot 50 \cdot 3{,}14 = 314$ *cm*, also der Kraftgewinn = 314. Allerdings geht gerade bei der Schraube stets ein sehr beträchtlicher Teil des Kraftgewinnes durch die große Reibung der Spindel in der Mutter verloren.

Sehr schön findet man die goldene Regel bestätigt; denn dreht man die Spindel etwa einmal herum, so ist der Weg der Kraft gleich dem Umfang des Schraubenschlüsselkreises (314 *cm*), der Weg der Last ist aber bloß eine Ganghöhe (1 *cm*) d. h. die Last ist nur um eine Ganghöhe (1 *cm*) gehoben; sovielmal also die Kraft kleiner ist als die Last (314 mal), ebensovielmal ist ihr Weg größer als der Weg der Last (314 mal). Demnach ist auch bei der Schraube die Arbeit der Kraft = der Arbeit der Last (Gesetz der Maschinen).

260. Anwendung der Schrauben.

Die Schraube wird angewandt zum Heben schwerer Lasten, besonders wenn dieselben nicht hoch gehoben werden müssen, z. B. zum Aufziehen von Schleusen. Die Schleuse ist an einer vertikalen Schraubenspindel befestigt, welche durch ein Loch eines oben angebrachten Querbalkens geht; auf die Spindel ist die Mutter gesteckt und so tief heruntergedreht, bis sie auf dem Querbalken aufsteht. Dreht man die Mutter, indem man sie mittels eines Schlüssels packt, noch weiter, so geht, da die Mutter nicht mehr weiter abwärts kann, die Spindel und somit die Schleuse nach aufwärts.

Ähnlich: zum Heben der Schienenträger an den Zufahrtstellen der Schiffbrücken.

Die Schraubenpresse. (Fig. 328). Mit einer starken Unterlage ist ein starker Eisenbügel verbunden, welcher oben die Schraubenmutter enthält; durch diese geht die Spindel, welche oben getrieben wird durch einen Schlüssel und unten auf eine Platte drückt; zwischen diese und die Unterlage wird der zu pressende Körper gelegt; der Widerstand, den derselbe dem Zusammenpressen entgegengesetzt, ist

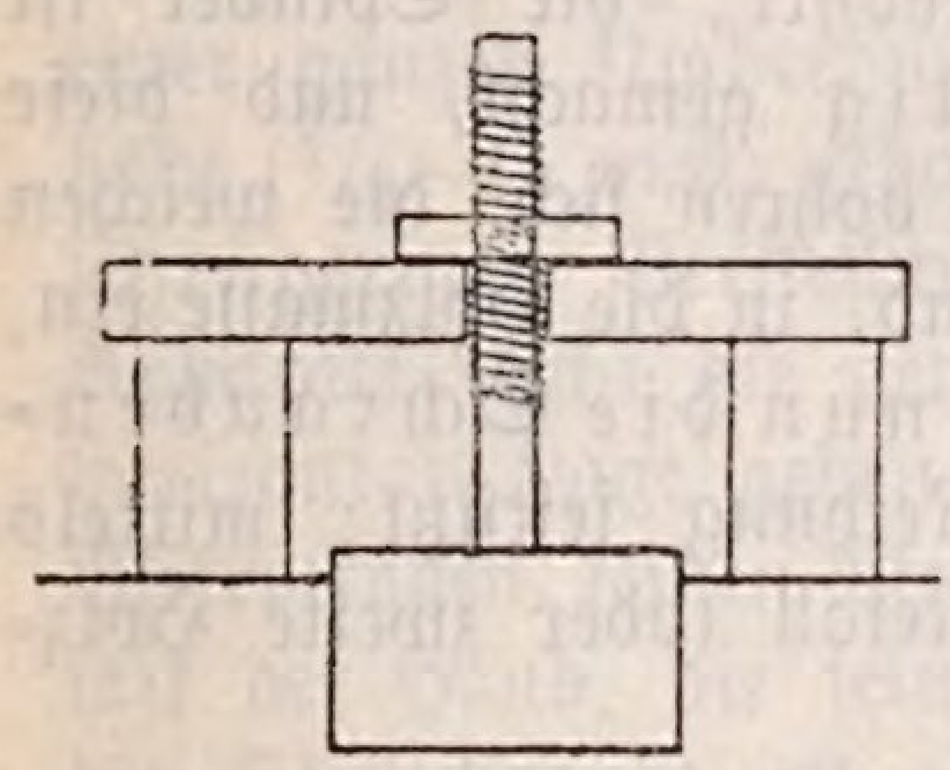


Fig. 327.

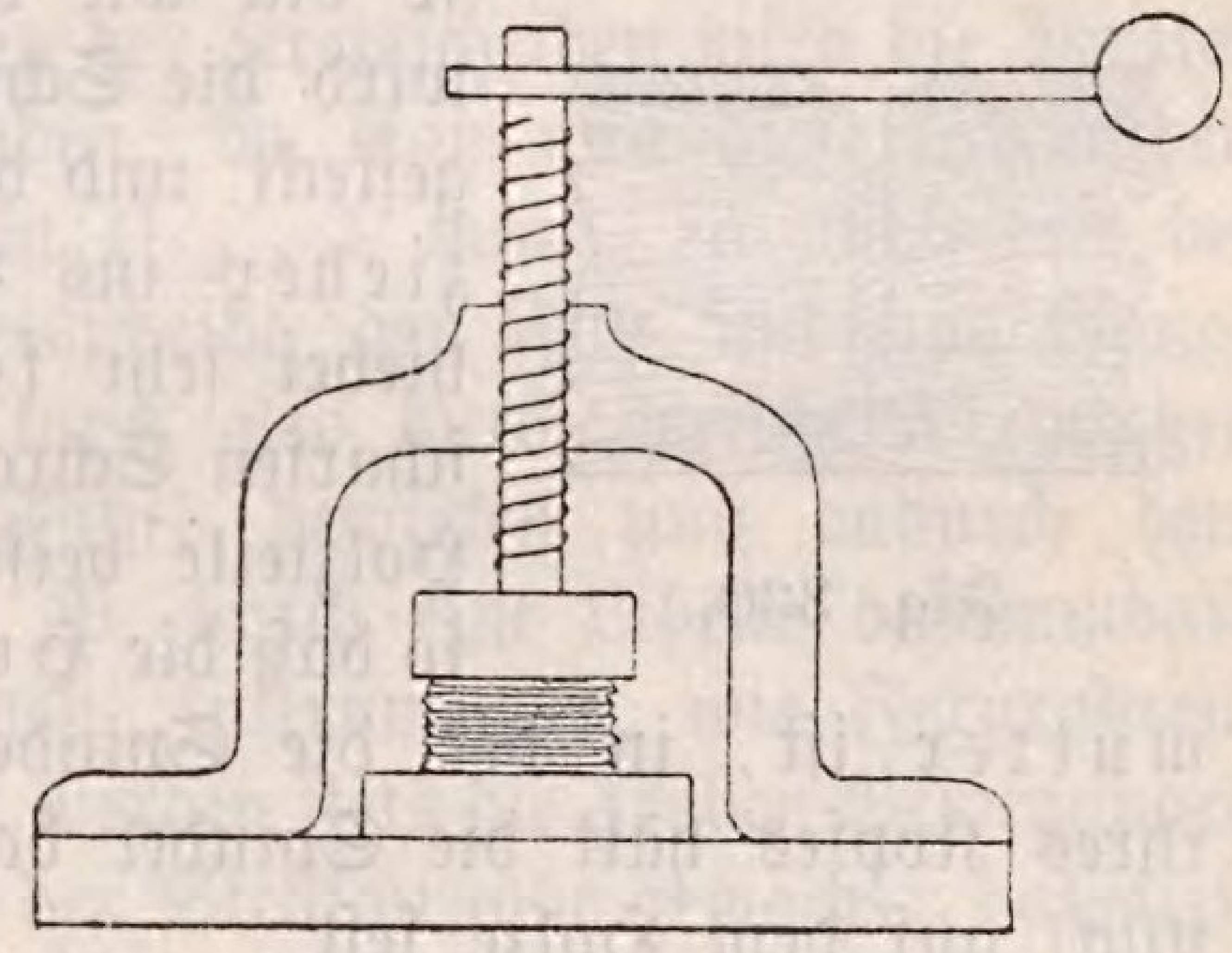


Fig. 328.

gleichsam die in der Richtung der Spindel wirkende Last, die überwunden wird. Hat die Maschine etwa 2 *cm* Ganghöhe und 60 *cm* Schlüssellänge, also einen Kraftgewinn $= \frac{2 \cdot 60 \cdot 3,14}{2} = 188,4$ und drückt man mit der Kraft von 20 *kg*, so gibt das einen Spindeldruck von $20 \cdot 188,4 = 3768$ *kg* = 75 Ztr.; der Körper wird von der Spindel gepreßt, wie wenn auf ihm 75 Ztr. lägen. Solche Schraubenpressen werden verwendet als Stempel-, Buchbinder-, Kelter-Pressen u. s. w. Auch die gewöhnliche Schraubenzwinge, durch welche etwa der Schreiner zwei geleimte Bretter zusammendrückt, bis der Leim getrocknet ist, durch welche man Gegenstände vorübergehend an einem Tisch befestigt, sowie der Schraubstock u. s. w. sind Schraubenpressen, ebenso wie die Klemmschrauben, die so vielfach bei galvanischen Apparaten zur Verbindung der Drähte Anwendung finden. Sehr manigfach ist die Anwendung von Schrauben zum Befestigen von Gegenständen aneinander. Sollen etwa zwei Metallplatten auf einander befestigt werden, so werden beide durchbohrt und durch dieses Loch wird ein Schraubenbolzen gesteckt, das ist ein runder Eisenstab, der an einem Ende einen hervorragenden Kopf hat und am anderen Ende mit Schraubengewinde versehen ist. Auf dies herausschauende Gewinde wird eine Mutter eingedreht, bis sie die Platte berührt, und nun mittels

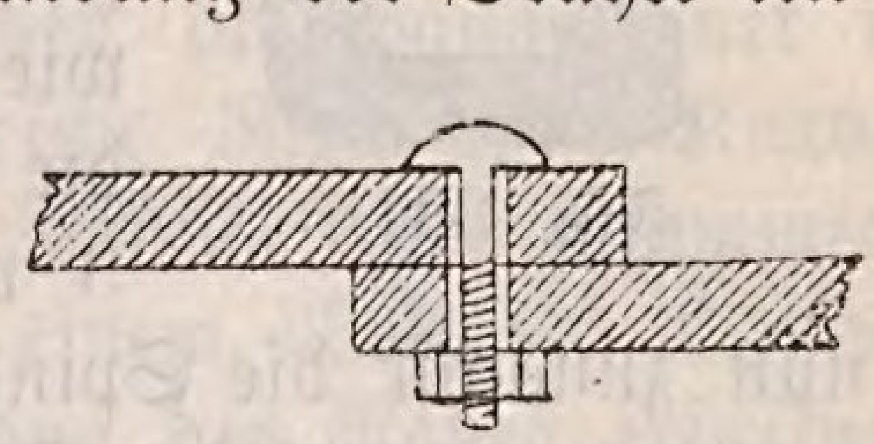


Fig. 329.

eines Schlüssels noch recht fest angezogen. Durch Mutter und Kopf werden dabei vermittels der Spindel beide Platten sehr stark an einander gedrückt, und es bleibt auch, wenn man aufhört mit dem Schlüssel anzuziehen, dieser Druck erhalten, weil die Mutter wegen der großen Reibung nicht imstande ist, zurückzugehen.

Auch um Metall auf Holz, oder Holz auf Holz zu befestigen, bedient man sich der Schraube; es wird das Metall durchbohrt, so daß die Spindel gut durchgeht, und ins Holz wird ein Loch gebohrt so dick wie der massive Kern der Spindel; nun wird die Schraube durch das Metall in das Holz gesteckt, und durch Drehen mit dem Schraubenzieher ins Holz eingebohrt; die Spindel ist hiebei sehr scharfkantig gemacht, und diese scharfen Schraubengänge bohren sich, die weichen Holzteile beiseite schiebend, in die Holzmasse ein, so daß die Holzmasse nun die Schraubenmutter ist, in der die Spindel durch Reibung festsitzt; mittels ihres Kopfes hält die Spindel dann das Metall (oder zweite Holzstück) auf dem Holze fest.

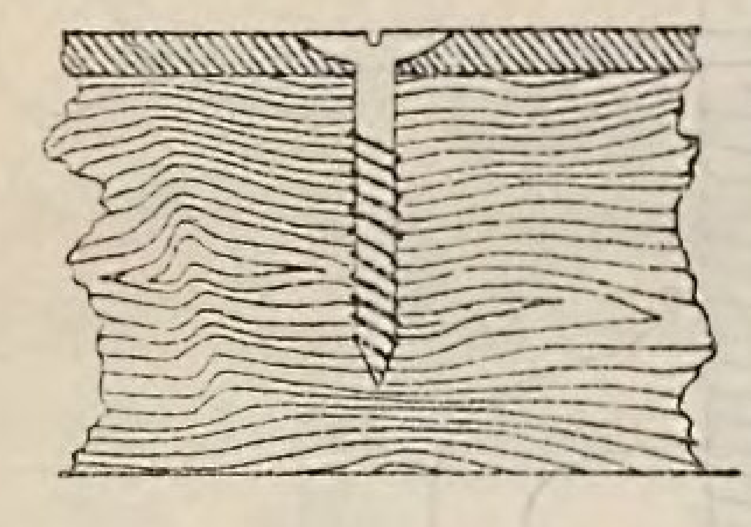


Fig. 330.

Das Schraubenmikrometer dient dazu, um die Dicke von dünnen Gegenständen z. B. Blechen, Drähten, dünnen Achsen und Zapfen u. s. w. zu messen. Es ist, so wie es der Mechaniker meist als Kalibermaß benützt, folgendermaßen eingerichtet. Ein Eisenbügel hat an einem Arme eine Schraubenmutter, durch welche eine Schraubenspindel, die Mikrometerschraube, geht; beide müssen sehr exakt gearbeitet sein. Dem Schraubenspindelende gegenüber ist am anderen Arm des Bügels ein Vorsprung (Daumen) angebracht. Auf der Schraubenspindel ist oben ein Kreis oder eine Trommel angebracht, die in etwa 100 gleiche Teile geteilt ist; neben derselben ist ein am Bügel befestigter Zeiger, so daß man sehen kann, welcher Teilstrich oben am Zeiger steht; auf diesem Zeiger sind zugleich Teilstriche angebracht, welche angeben, wie hoch die Kreisscheibe (Trommel) steht, wenn die Spindel von ihrer untersten Stelle aus 1, 2, 3 u. s. w. Umdrehungen gemacht hat. Es wird nun zunächst die Spindel ganz hinuntergedreht, bis sie den Daumen berührt; in dieser Stelle soll der Nullpunkt der Kreisteilung am Zeiger stehen. Nun schraubt man die Spindel aufwärts, bringt das Blech zwischen Spindel und Vorsprung und schraubt die Spindel wieder abwärts, bis sie das Blech berührt und sieht nun, wie viele ganze Schraubenumgänge, und an der Stellung der Kreisteilung gegen den Zeiger, wie viel Hundertel des folgenden Umgangs die Spindel

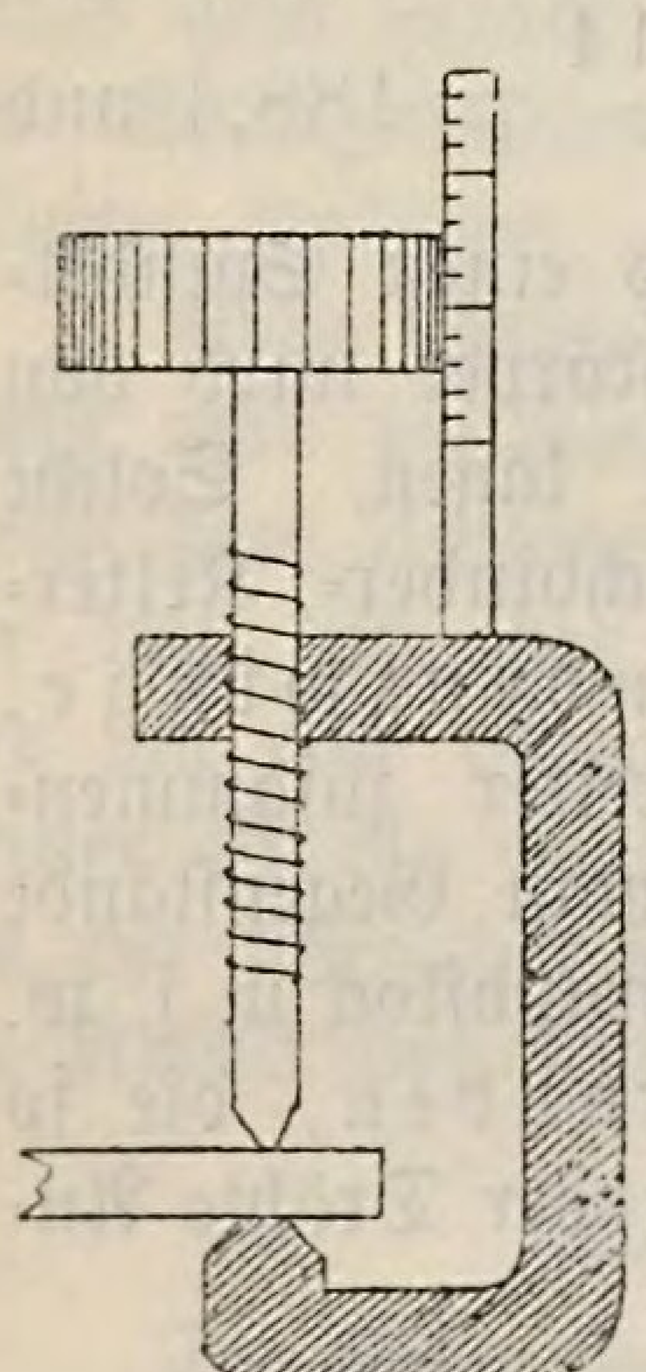


Fig. 331.

gemacht hat; weiß man nun, wie groß die Ganghöhe der Spindel ist, z. B. 1 *mm*, so kann man dadurch mit großer Genauigkeit die Dicke des Bleches erfahren.

Die Stellschraube. Soll ein Gegenstand z. B. ein Tisch, ein Stativ, ein physikalischer Apparat, eine Wage u. s. w. horizontal gestellt werden können, so werden an den Füßen Stellschrauben angebracht; das sind Schraubenspindeln, welche durch die an den Füßen angebrachten Schraubenmuttern senkrecht nach abwärts gehen, mit ihren stumpfen Enden am Boden aufstehen und oben breite Kreisscheiben tragen; durch Drehen der Kreisscheiben wird die Mutter und dadurch der Fuß etwas gehoben; da man nun diese Schrauben von sehr geringer Ganghöhe macht ($^1/_2$—1 *mm*), so wird erst bei einer ganzen Umdrehung der Kreisscheibe der Fuß um eine Ganghöhe ($^1/_2$—1 *mm*) gehoben, man kann also durch geringe Drehungen sehr geringe Verstellungen des Fußes bewirken und dadurch dem Apparate leicht die gewünschte, z. B. durch eine Libelle bestimmbare horizontale Lage geben. Bei feinen Instrumenten, wie Fernrohren, Mikroskopen, feinen Meßapparaten werden stets die groben Bewegungen mit der Hand, die feinen mittels der Stellschraube gemacht; dabei ist die Stellschraube oft zugleich als Mikrometerschraube gerichtet, d. h. so, daß man aus der Größe der gemachten Drehung die Größe der hervorgebrachten Bewegung berechnen kann.

Eine wichtige Anwendung findet die Schraube als Schiffsschraube zur Bewegung der Dampfschiffe. Die Spindel oder Welle ragt hinten aus dem Schiffe horizontal heraus und wird durch die Dampfmaschine in rasche Umdrehung versetzt. Auf der Welle sind 3 oder 4 Flügel angebracht, welche wie Schraubenflächen gestaltet sind, aber nur je einen Teil eines ganzen Umlaufes, etwa nur $^1/_4$ oder $^1/_6$ darstellen. Das umliegende Wasser bildet gleichsam die Schraubenmutter, und da die Schraubenflügel bei der Umdrehung einen Druck auf das Wasser ausüben, so übt das Wasser einen Gegendruck aus auf die Schraubenflügel, und durch diesen wird das Schiff bewegt.

Die Schraube ohne Ende. Die Last greift am Umfang einer Welle an etwa mittels eines Seiles; das zugehörige Rad ist gezahnt und greift mit seinen Zähnen zwischen die Gänge einer in Zapfen liegenden Schraubenspindel ein, welche durch eine Kurbel gedreht werden kann. Sie ist ein hübsches Beispiel einer zusammengesetzten Maschine, denn sie besteht 1. aus einem Wellrad, 2. aus einer Schraube; die Kraft y, die am Umfang des Rades erforderlich ist, wirkt als Last an der Spindel der Schraube.

Es ist also 1) $Q : y = R : r$,

$y : P = 2K\pi : h$ (K = Kurbel, h = Ganghöhe).

hieraus $\frac{Q}{P} = \frac{R \cdot 2K\pi}{r \cdot h} = \frac{R}{r} \cdot \frac{2K\pi}{h}$; das heißt:

auch der Kraftgewinn dieser zusammengesetzten Maschine ist gleich dem Produkt der Kraftgewinne der einzelnen einfachen Maschinen.

261. Gleichförmige Bewegung.

Eine gleichförmige Bewegung ist eine solche, bei welcher in gleichen Zeiten gleiche Wege zurückgelegt werden. Geschwindigkeit ist der Weg, den der Körper in einer Zeiteinheit (meistens in 1″) zurücklegt. Bezeichnet man die Geschwindigkeit mit c, die Zeit mit t, so ist der Weg s:

$$s = ct.$$

Eine gleichförmige Bewegung findet unter folgenden Verhältnissen statt: 1. Wenn ein Körper eine Geschwindigkeit hat und sonst auf ihn weder eine Kraft noch ein Hindernis einwirkt; er behält dann nach dem Trägheitsgesetze die Geschwindigkeit unverändert bei; die Bewegung ist dabei geradlinig, da ein Körper auch die Richtung der Bewegung nicht selbständig zu verändern vermag. 2. Wenn ein Körper schon eine Geschwindigkeit hat, und auf ihn eine Kraft wirkt, welche gerade im stande ist, die der Bewegung entgegenwirkenden Kräfte oder entgegenstehenden Hindernisse zu überwinden. Beispiele: ein auf der Straße fahrender Wagen, der Eisenbahnzug, wenn er auf ebener Strecke im Laufen ist, das Schiff, das durch Wind oder Dampf (oder Strömung) oder beides in gleichförmiger Bewegung erhalten wird, u. s. f. Bei dieser Bewegung muß Arbeit aufgewendet werden, da eine Kraft längs eines Weges wirkt; ihre Größe wird gemessen durch das Produkt aus Kraft mal Weg. 3. Man nennt eine Bewegung auch dann noch gleichförmig, wenn in einer der vorigen Arten die Richtung der Bewegung beständig so verändert wird, daß statt der geradlinigen eine krummlinige Bewegung eintritt, die Geschwindigkeit aber unverändert bleibt. Hierüber mag vorderhand die Bemerkung genügen, daß auch eine von außen auf den Körper einwirkende Kraft notwendig ist, um diese Richtungsänderung hervorzubringen.

262. Der freie Fall.

Nach dem Trägheitsgesetz verharrt jeder Körper in seinem Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen geradlinigen Bewegung, so lange er nicht durch einwirkende Kräfte gezwungen wird, diesen Zustand zu ändern. Wirkt eine Kraft auf einen frei beweglichen Körper, so ändert sie dessen Bewegungszustand, indem sie die Bewegung desselben langsamer oder rascher macht, oder auch die Richtung der Bewegung ändert. Wir betrachten zunächst die einfachste Art einer solchen Kraftwirkung, wenn eine konstante, d. h. der Größe oder Intensität nach gleichbleibende Kraft auf einen Körper wirkt, und wählen dazu als Beispiel die Schwer-

kraft, die ja innerhalb der gewöhnlich vorkommenden Grenzen als konstant angenommen werden darf; denn wenn ein Körper der Erdoberfläche nahe ist, wird er ebenso stark angezogen, als wenn er sich einige Hundert Meter über derselben befindet. Die Wirkung der Anziehung vollzieht sich auf folgende Weise: Ist der Körper anfangs in Ruhe, so erteilt ihm die Schwerkraft eine Bewegung, und zwar erhält er im Laufe einer Sekunde eine Geschwindigkeit von ca 10 *m*; d. h. wenn am Ende der ersten Sekunde die Schwerkraft aufhören würde zu wirken, und der Körper bloß dem Beharrungsvermögen folgen würde, so würde er in der folgenden und in jeder folgenden Sekunde einen Weg von 10 *m* zurücklegen.

In der zweiten Sekunde behält er die in der ersten Sekunde erlangte Geschwindigkeit von 10 *m* bei und bekommt von der Schwerkraft, welche während der zweiten Sekunde ebenso wirkt wie in der ersten, noch eine Geschwindigkeit von 10 *m* dazu, so daß er am Ende der zweiten Sekunde eine Geschwindigkeit von 20 *m* hat. Während der dritten Sekunde behält er die vorhandene Geschwindigkeit von 20 *m* bei und bekommt von der Schwerkraft wieder eine Geschwindigkeit von 10 *m* dazu, so daß er am Ende der dritten Sekunde eine Geschwindigkeit von 30 *m* hat. So geht es fort; nach 4 Sekunden ist seine Geschwindigkeit = 40 *m*, nach n Sekunden ist seine Geschwindigkeit = $n \cdot 10$ *m*. Der Betrag von 10 *m* ist nicht genau richtig, sondern ist in Wirklichkeit = 9,809 . . . *m*; er wird stets mit g bezeichnet und heißt die Beschleunigung der Schwerkraft, weil um diesen Betrag die Geschwindigkeit in jeder Sekunde größer oder schleuniger gemacht wird. Da eine konstante Kraft in jeder Sekunde dieselbe Beschleunigung hervorbringt, so nennt man die durch eine konstante Kraft hervorgebrachte Bewegung eine gleichförmig beschleunigte Bewegung; der freie Fall eines schweren Körpers ist also eine solche. Bezeichnen wir die Sekundenzahl mit t, und die in dieser Zeit erlangte Geschwindigkeit mit v, so ist

$$v = gt \quad \text{(I)}.$$

Wir betrachten nun die Wege, die der Körper in den einzelnen Sekunden zurücklegt. Am Anfang der ersten Sekunde hat der Körper noch gar keine Geschwindigkeit, eine Geschwindigkeit = 0, am Ende der ersten Sekunde hat er eine Geschwindigkeit = 10 *m*; da seine Geschwindigkeit hiebei ganz gleichmäßig von 0 bis 10 *m* wächst, so schließt man als das einfachste, daß er dabei ebensoweit kommt, wie wenn er sich mit der mittleren Geschwindigkeit von 5 *m* bewegt hätte; in der That fand man, daß der Weg, den er in der ersten Sekunde zurücklegt, = 5 *m*, gleich dem Mittel aus Anfangs- und Endgeschwindigkeit ist. Am Anfang der zweiten Sekunde hat er eine Geschwindigkeit von 10 *m*, am Ende der zweiten Sekunde eine Geschwindigkeit von 20 *m*; man

fand, daß der Weg, den er in der zweiten Sekunde zurücklegt, = 15 *m*, gleich dem Mittel aus beiden Geschwindigkeiten ist. Ebenso hat er in der dritten Sekunde am Anfang 20 *m*, am Ende 30 *m* Geschwindigkeit; der Weg in der dritten Sekunde beträgt 25 *m*; so geht es fort, der Weg in der vierten Sekunde ist 35 *m* ꝛc. Man fand also: Die Wege, welche der Körper in den einzelnen Sekunden zurücklegt, bilden eine arithmetische Reihe, deren Anfangsglied a = 5 *m*, genauer = $^1/_2$ g ist, und von denen jedes folgende Glied um 10 *m*, genauer um g, größer ist als das vorhergehende; also die Differenz d aufeinanderfolgender Glieder = 10 *m*, genauer = g.

Will man die ganze Höhe berechnen, die der Körper im Laufe von t Sekunden durchfällt, so kann man wieder als das einfachste schließen, daß der Körper ebensoweit kommt, wie wenn er t Sekunden lang sich mit der mittleren Geschwindigkeit $\frac{0 + gt}{2} = \frac{gt}{2}$ bewegt hätte, daß also sein Weg $s = \frac{gt^2}{2}$ ist. Dasselbe findet man auch, wenn man die Wege der einzelnen Sekunden addiert, also die Summe dieser arithmetischen Reihe bildet; dies geschieht nach der Formel $s = na + n \cdot (n - 1)\frac{d}{2}$, wobei $n = t$, $a = \frac{g}{2}$, $d = g$ zu setzen ist; also ist:

$$s = t \cdot \frac{g}{2} + t\,(t-1)\,\frac{g}{2} = \frac{tg}{2} + \frac{t^2 g}{2} - \frac{tg}{2}$$

$$s = g\,\frac{t^2}{2} \quad \text{(II.)}$$

263. Beweis der Fallgesetze.

Diese zwei Formeln

$$\mathbf{v = gt\ (I)\,;\quad s = \frac{gt^2}{2}\ (II)}$$

enthalten die Fallgesetze und wir betrachten jetzt, wie sie ihr berühmter Entdecker Galilei gefunden und bewiesen hat. Der bekannte schiefe Turm zu Pisa gab ihm passende Gelegenheit, zu untersuchen, von welcher Höhe er eine Bleikugel fallen lassen müsse, damit sie nach einer oder nach zwei oder nach drei Sekunden zu Boden fällt, und er fand, daß die Höhe bei zwei Sekunden 4 mal, bei drei Sekunden 9 mal größer sein muß als bei einer Sekunde: die Fallhöhen verhalten sich wie die Quadrate der Zeiten (II). Hieraus das Fallgesetz ahnend, untersuchte er es durch den Fall auf der schiefen Ebene: Er nahm eine lange Holzrinne,

mit glattem Pergament ausgekleidet, neigte sie etwas (schiefe Ebene) und ließ Elfenbeinkugeln herabrollen. Da diese auf der schiefen Ebene verhältnismäßig langsam herabrollen, so war es ihm möglich, den Lauf derselben, insbesondere die Wege in den einzelnen Sekunden zu verfolgen und zu messen. Es ist ja hiebei die Masse der Kugel dieselbe wie beim freien Falle, aber während beim freien Falle die ganze Schwerkraft auf die Masse bewegend wirkt, wirkt auf der schiefen Ebene bloß die parallel der schiefen Ebene wirkende Komponente $P = Q \cdot \sin \alpha$ bewegend. Diese ist aber kleiner ($\sin \alpha$ mal größer), deshalb bringt diese Kraft auch bloß eine kleinere Beschleunigung hervor (eine $\sin \alpha$ mal größere Beschleunigung); es ist also die Bewegung auf der schiefen Ebene auch eine gleichförmig beschleunigte Bewegung und ganz ähnlich der des freien Falles, nur statt g steht überall $g \sin \alpha$; so fand Galilei, daß stets der Weg s ausdrückbar war durch $s = g \sin \alpha \frac{t^2}{2}$, wie er auch die Neigung α, die Zeit t oder den Weg s veränderte. So fand und bewies Galilei nicht bloß das Gesetz vom freien Falle, sondern auch das vom Falle auf der schiefen Ebene; bei letzterer ist also die Beschleunigung $= g \sin \alpha$, demnach $v = gt \sin \alpha$, und $s = \frac{gt^2}{2} \sin \alpha$.

Sehr schön lassen sich diese Gesetze auch erweisen mittels der Atwoodschen Fallmaschine (1784). Sie besteht aus einer vertikal gestellten Säule, auf welcher oben eine sehr leicht drehbare leichte Rolle angebracht ist; um sie ist ein Faden gelegt, an dessen Enden cylindrische gleiche Gewichte von etwa je 200 *g* hängen. Die auf beide Gewichte wirkenden Schwerkräfte heben sich auf, so daß man sagen kann: diese zwei Gewichte stellen eine Masse von 400 *g* dar, die dem Einflusse der Schwere nicht unterliegt. Legt man nun auf ein Gewicht ein Übergewicht etwa von 10 *g*, so sinkt dieses Gewicht, während das andere steigt; aber diese Bewegung ist eine sehr langsame. Würde man nämlich das Übergewicht, 10 *g*, frei fallen lassen, so würde die Kraft von 10 *g* dazu verwendet werden, um eine Masse von 10 *g* in Bewegung zu setzen, das gäbe die bekannte rasche Fallbewegung mit der Beschleunigung $g = 10\ m$. Liegen aber die 10 *g* Übergewicht auf dem einen Gewichte, so wird nun die Kraft von 10 *g* dazu verwendet, um die Masse von 410 *g* in Bewegung zu setzen, also eine 41mal größere Masse; deshalb bekommt diese 41 mal größere Masse auch nur eine 41 mal kleinere Bescheunigung, $g' = {}^{10}/_{41}\ m$, macht also eine verhältnismäßig langsame Bewegung. An der Säule ist ein Maßstab angebracht, an welchem man die durchlaufenen Strecken abliest; ein laut schlagendes Uhr-

werk gibt die Enden der einzelnen Sekunden an. Man bringt ein passendes Übergwicht an und untersucht, ob die Fallräume dem Gesetz entsprechen; man macht mehrere Versuche mit verschiedenen Übergewichten, wohl auch mit verschiedenen Massen, indem man statt je 200 *g* etwa je 300 ꝛc. nimmt und sieht, wie auch diese Bewegungen dem Gesetz entsprechen. Man kann durch besonders sorgfältig ausgeführte Apparate und Messungen wohl auch die Größe des g annähernd bestimmen, jedoch ohne besondere Genauigkeit, weil Reibung und Luftwiderstand nicht ganz zu beseitigen sind.

Mit diesem Apparat kann man auch die Richtigkeit des ersten Gesetzes $v = gt$ beweisen durch Messung der Endgeschwindigkeiten. Man gibt dem Übergewichte die Form eines Stäbchens, das horizontal auf das Gewicht gelegt wird, so daß seine Enden herausragen; man beobachtet dann, wie weit das Gewicht in einer Sekunde heruntersinkt, und bringt an dieser Stelle einen Ring an, der das Gewicht durchgehen läßt, das herausragende Übergewicht aber auffängt. Läßt man nun wieder die Gewichte heruntersinken, so wird gerade am Ende der ersten Sekunde durch den Ring das Übergewicht weggenommen, die Gewichte bewegen sich mit der ihnen eigentümlichen Geschwindigkeit weiter, ohne daß die Schwerkraft an ihnen wirkt, sie legen also in den folgenden Sekunden Räume zurück, die der Endgeschwindigkeit der ersten Sekunde entsprechen. Man mißt diese Räume und findet so das Gesetz der Endgeschwindigkeit bestätigt. Wenn etwa das Gewicht in der ersten Sekunde 12 *cm* zurücklegt $\left(s_1 = \frac{24}{2} \cdot 1^2\right)$, so findet man, daß es, vom Übergewicht befreit, nun in jeder folgenden Sekunde 24*cm* zurücklegt ($v_1 = 24 \cdot 1$). Hat es in den ersten zwei Sekunden 48 *cm* zurückgelegt $\left(s_2 = \frac{24}{2} \cdot 2^2\right)$ so findet man, daß es, vom Übergewichte befreit, dann in jeder, folgenden Sekunde 48 *cm* zurücklegt ($v_2 = 24 \cdot 2$) u. s. f.

Man sagt: bei der Wirkung einer konstanten Kraft, also auch beim freien Falle, ist die Beschleunigung konstant, d. h. der Geschwindigkeitszuwachs ist zu gleichen Zeiten gleich groß; $v = gt$, d. h. die Endgeschwindigkeit ist proportional der Zeit; $s = \frac{gt^2}{2}$, d. h. der Weg oder die Fallhöhe ist proportional dem Quadrate der Zeit; aus beiden Gleichungen folgt: $v = \sqrt{2\,gs}$, d. h. **die Geschwindigkeit ist proportional der Quadratwurzel aus der Fallhöhe** (und proportional der Quadratwurzel aus der Beschleunigung).

264. Fall auf der schiefen Ebene.

Für die schiefe Ebene gelten die Gesetze:

$$v = gt \sin \alpha, \quad s = \frac{gt^2}{2} \sin \alpha, \text{ also } v = \sqrt{2\, gs \sin \alpha}.$$

Wir beweisen: Wenn ein Körper über eine schiefe Ebene von der Höhe h und beliebiger Neigung α herunterläuft, so erlangt er dieselbe Endgeschwindigkeit, wie wenn er die Höhe der schiefen Ebene frei durchfällt.

Beim freien Fall über die Höhe h ist seine Endgeschwindigkeit aus der Formel $v = \sqrt{2\, gs}$ zu berechnen für $s = h$, also $v = \sqrt{2\, gh}$. Beim Fall auf der schiefen Ebene ist $v = \sqrt{2\, gs \sin \alpha}$; aber s ist hiebei die Länge l der schiefen Ebene: diese ist $l = \frac{h}{\sin \alpha}$;

also $v = \sqrt{2\, g \frac{h}{\sin \alpha} \cdot \sin \alpha} = \sqrt{2\, gh}$ wie vorher, q. e. d. Es ist also auch gleichgültig, ob die schiebe Ebene ihre Neigung verändert (krumme Bahn). Die Endgeschwindigkeit ist auf allen in der Figur 332 gezeichneten und ähnlichen Wegen dieselbe, und zwar die durch den freien Fall über die Höhe erlangte.

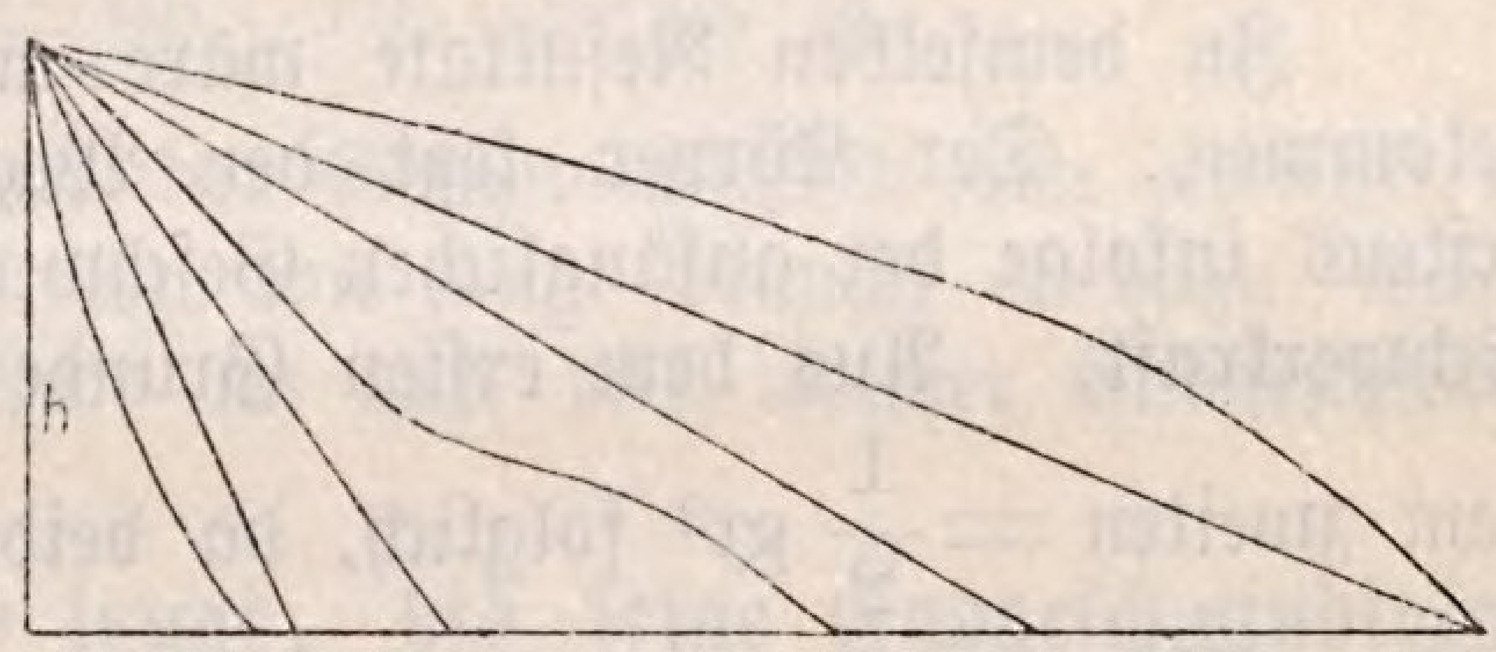


Fig. 332.

Beweise: Ein Körper durchfällt den Durchmesser eines Kreises in derselben Zeit, in welcher er irgend eine vom oberen Ende des Durchmessers ausgehende (oder zum unteren Ende führende) Sehne des Kreises durchläuft.

265. Bewegung eines vertikal geworfenen Körpers.

Wir betrachten die Bewegung, welche ein vertikal abwärts geworfener Körper macht. Der Körper hat eine gewisse Anfangsgeschwindigkeit $= a$ und bekommt durch die Schwerkraft einen Geschwindigkeitszuwachs, der gerade so groß ist, wie wenn der Körper am Anfange keine Geschwindigkeit gehabt hätte, also g in 1", gt in t". Denn durch die Wirkung der Schwerkraft bekommt der Körper in gleichen Zeiten stets dieselbe Geschwindigkeitsänderung, gleichgültig ob und welche Bewegung er anfangs hatte. Diese Geschwindigkeit gt tritt zur schon vorhandenen Geschwindigkeit a hinzu, da beide in derselben Richtung stattfinden; also ist die Endgeschwindigkeit v nach t"

$$v = a + gt.$$

Weg in der ersten Sekunde: Am Anfang der ersten Sekunde hat er eine Geschwindigkeit a am Ende eine Geschwindigkeit $a + g$; der Weg in der ersten Sekunde ist demnach wie früher gleich dem Mittel aus beiden Geschwindigkeiten, $= a + \frac{1}{2} g$; ebenso findet man den Weg in der zweiten Sekunde $= a + \frac{1}{2} g + g$, in der dritten Sekunde $= g + \frac{1}{2} g + 2 g$ rc. Die Wege in den einzelnen Sekunden bilden wieder eine arithmetische Reihe, deren Anfangsglied $= a + \frac{g}{2}$, deren Differenz $= g$, deren Summe also

$$s = t\left(a + \frac{g}{2}\right) + t \cdot (t - 1) \cdot \frac{g}{2}$$

$$= at + \frac{tg}{2} + \frac{t^2 g}{2} - \frac{tg}{2}$$

$$\mathbf{s = at + \frac{t^2 g}{2}.}$$

Zu demselben Resultate wäre man auch auf folgende Weise gekommen: Der Körper legt den Weg aus zwei Ursachen zurück, erstens infolge der anfänglichen Geschwindigkeit, zweitens infolge der Schwerkraft. Aus dem ersten Grunde wäre der Weg $= a t$, aus dem zweiten $= \frac{1}{2} gt^2$ folglich, da beide Ursachen den Weg in derselben Richtung hervorbringen, ist der wirkliche Weg gleich der Summe der Wege, die durch die einzelnen Ursachen hervorgebracht würden.

Wir betrachten die Bewegung des Körpers, der mit einer Anfangsgeschwindigkeit a senkrecht nach aufwärts geworfen wird.

Hiebei verringert die Schwerkraft die vorhandene Geschwindigkeit in jeder Sekunde um g, also in t'' um gt, also ist die Endgeschwindigkeit v nach t Sekunden

$$\mathbf{v = a - gt.}$$

Der Weg in der ersten Sek. ist, ähnlich wie früher abgeleitet, $= a - \frac{1}{2} g$, in der zweiten $= a - \frac{1}{2} g - g$, in der dritten $= a - \frac{1}{2} g - 2 g$ u. s. w.; diese Wege bilden wieder eine arithmetische Reihe, deren Differenz, $= - g$, also ist der in t'' durchlaufene Weg, oder die Summe:

$$s = t\left(a - \frac{g}{2}\right) - t\cdot(t-1)\,\frac{g}{2}, \text{ oder vereinfacht:}$$

$$\mathbf{s = a\,t - \frac{g\,t^2}{2}.}$$

Dasselbe Resultat erhält man auch auf folgende Weise: Der Körper legt den Weg zurück durch die Wirkung zweier Ursachen: die anfängliche Geschwindigkeit a würde einen Weg at hervorbringen nach aufwärts; die Schwerkraft würde einen Weg $= \frac{g\,t^2}{2}$ hervorbringen nach abwärts; durch das Zusammenwirken beider Ursachen kommt also ein Weg zustande $s = a\,t - \frac{g\,t^2}{2}$.

Wir rechnen folgende Beispiele:

Wie hoch kommt ein mit der Geschwindigkeit von 68 *m* nach aufwärts geworfener Körper in 5 Sek. und welche Endgeschwindigkeit hat er dann?

$$s = at - \frac{g\,t^2}{2} = 68.5 - 5.5^2 = 215\ m.$$

$$v = a - gt = 68 - 10.5 = 18\ m.$$

Wie hoch steigt ein mit der Geschwindigkeit von $a = 80$ *m* nach aufwärts geworfener Körper, wie lange braucht er dazu, wann kommt er wieder auf der Erde an und mit welcher Endgeschwindigkeit?

Der Körper steigt so lange, bis seine Endgeschwindigkeit $= 0$ ist, also $0 = a - gt$; $0 = 80 - 10\,t$.

$$t = \frac{a}{g};\ t = 8 \text{ Sekunden.}$$

Der zurückgelegte Weg, die Steighöhe, berechnet sich aus $s = a\,t - \frac{g\,t^2}{2}$, wenn man $t = \frac{a}{g}$; $= 8$ setzt.

$$s = \frac{a^2}{g} - \frac{g\,a^2}{2\,g^2};\ s = 80\cdot 8 - 5\cdot 8^2$$

$$s = \frac{a^2}{2\,g};\qquad s = 320\ m.$$

Die Steighöhe ist dem Quadrat der Anfangsgeschwindigkeit proportional; wird der Körper mit doppelt so großer Anfangsgeschwindigkeit geworfen, so steigt er 4 mal höher.

Ist der Körper an diesem höchsten Punkte angelangt, so hat er einen Moment lang die Geschw. $= 0$, ist in Ruhe; sofort aber fällt er nach den gewöhnlichen Fallgesetzen. Die Zeit, die er braucht, um die erreichte Höhe wieder herabzufallen, berechnet sich aus

$$s=g\frac{t^2}{2}, \text{ wobei } s=\frac{a^2}{2g}; \text{ das gibt } \frac{a^2}{2g}=\frac{gt^2}{2},$$

hieraus ist $t=\frac{a}{g}$, d. h. **der Körper braucht zum Herabfallen dieselbe Zeit wie zum Hinaufsteigen.** Die Endgeschw., mit der er am Boden ankommt, berechnet sich aus $v=gt$, wo $t=\frac{a}{g}$, also $v=g\cdot\frac{a}{g}$, $v=a$; **er kommt mit derselben Geschwindigkeit an, mit der er geworfen wurde.**

Mit welcher Anfangsgeschwindigkeit muß ein Körper aufwärts geworfen werden, damit er eine Steighöhe $=h$ erreicht?

$$0=a-gt;\quad h=at-g\frac{t^2}{2}.$$

Hiebei ist h bekannt, a gesucht, die Auflösung gibt

$$\mathbf{a=\sqrt{2gh}.}$$

Das ist aber dieselbe Geschwindigkeit, welche der Körper erhält, wenn er die Höhe h frei herunterfällt.

Ein Körper wird mit der Geschwindigkeit a nach aufwärts geworfen, in welcher Zeit erreicht er den Punkt B in der Höhe h? $h=at-g\frac{t^2}{2}$; diese quadratische Gleichung, nach t aufgelöst, gibt:

$$t=\frac{1}{g}\left(a\pm\sqrt{-2gh+a^2}\right).$$

Es gibt also zwei Werte für t; beide haben eine Bedeutung; der eine, $t=\frac{1}{g}\left(a-\sqrt{-2gh+a^2}\right)$ gibt an, in welcher Zeit der Körper den Punkt B erreicht; der andere,

$$t=\frac{1}{g}\left(a+\sqrt{-2gh+a^2}\right) \text{ gibt an,}$$

welche Zeit der Körper braucht, um bis zum höchsten Punkte, den er vermöge seiner Geschwindigkeit erreichen kann, zu gelangen und von dort aus wieder herunterzufallen, bis er den Punkt B von oben her trifft. Die Geschwindigkeit, die er in B hat, berechnet sich aus

$$v=a-gt \text{ für } t=\frac{1}{g}\left(a\pm\sqrt{-2gh+a}\right); \text{ also}$$

$$v=a-a\mp\sqrt{-2gh+a^2}$$

$$v=\mp\sqrt{-2gh+a^2}.$$

Beide Werte von v haben Bedeutung; der positive bedeutet die nach *aufwärts gerichtete* Geschwindigkeit, mit welcher er den Punkt B erreicht, die negative bedeutet die *abwärts gerich-*

tete Geschwindigkeit, mit der er beim Herunterfallen wieder im Punkte B anlangt; man sieht, beide Geschwindigkeiten sind gleich groß und zwar für jeden Wert von h; also: **der Körper durchläuft jeden Punkt seiner Bahn zweimal, einmal beim Hinauf-, einmal beim Heruntergehen, beidesmal mit derselben Geschwindigkeit.** Die Werte von t und v werden imaginär, wenn $2gh > a^2$, also wenn $h > \frac{a^2}{2g}$, also der Punkt B höher liegt als die Steighöhe, die der Körper vermöge der Anfangsgeschwindigkeit a erreichen kann.

266. Ausflußgeschwindigkeiten von Flüssigkeiten.

In kommunizierenden Röhren steht die Flüssigkeit gleich hoch, wenn das spezifische Gewicht der Flüssigkeit in beiden Röhren das nämliche ist.

Daraus folgt das Gesetz des Springbrunnens; wenn man nämlich unten aus dem einen Gefäße eine Röhre herausleitet und sie mit einer nach aufwärts gerichteten Mündung endigen läßt, so springt aus ihr die Flüssigkeit heraus, steigt in die Höhe und zwar so hoch, als die Flüssigkeit im Gefäße steht; in Wirklichkeit erreicht sie die Höhe nicht ganz wegen der Reibung an den Wänden der Ausflußröhre und dem Luftwiderstande; doch wollen wir zunächst davon absehen.

Das ausfließende Wasser erlangt die Geschwindigkeit dadurch, daß es von den benachbarten Wasserteilen gedrückt wird. Sobald es aber die Mündung der Röhre verlassen hat, steht es nicht mehr unter diesem Drucke des Wassers, sondern ist anzusehen als ein mit Geschwindigkeit begabter Körper, der eben vermöge dieser Geschwindigkeit eine gewisse Steighöhe erreicht, und diese Steighöhe ist gleich der Höhe des Wassers im Gefäße.

Nun ist aber die Geschwindigkeit, welche ein nach aufwärts geworfener Körper haben muß, um eine gewisse Steighöhe h zu erreichen, gleich der Geschwindigkeit, welche der Körper erlangen würde, wenn er frei über dieselbe Höhe h herunterfallen würde; daraus folgt: **die Ausflußgeschwindigkeit ist so groß, wie wenn das Wasser den vertikalen Abstand vom Niveau des Wassers im Gefäße bis zur Mündung frei durchfallen hätte** (Torricelli).

$$v = \sqrt{2gh}.$$

Die Ausflußgeschwindigkeit ist demnach proportional der Quadratwurzel aus der Höhe; eine Öffnung, welche 2 mal tiefer unter dem Niveau liegt, liefert $\sqrt{2}$ mal mehr Wasser, und eine Öffnung, welche 2 mal mehr Wasser liefern soll, muß 4 mal tiefer unter dem Niveau liegen, wenn man beidesmal denselben Ausflußquerschnitt voraussetzt.

Es ist hiebei gleichgültig, ob die Mündung der Ausflußröhre nach oben oder nach einer anderen Richtung gerichtet ist. Die Menge des in einer gewissen Zeit ausfließenden Wassers ergibt sich, wenn man den Querschnitt der Mündung mißt (q), gleich dem Produkte aus Querschnitt mal Geschwindigkeit, also $= q \cdot v$ oder $= q \cdot \sqrt{2gh}$ in jeder Sekunde. Beispiel: Wie viel Liter fließen in 30 Min. aus einer Öffnung von 16 *qcm* Querschnitt bei einer konstanten Höhe von 12 *m*?

$q = 0{,}16\ qdm,\ h = 120\ dm,\ g = 98{,}09\ dm$: also

Menge $= 0{,}18 \cdot \sqrt{2 \cdot 98{,}09 \cdot 120} \cdot 60 \cdot 30 = 44180\ l$.

In Wirklichkeit ist aber die Ausflußmenge stets geringer als oben berechnet. Selbst wenn nämlich das Gefäß bis zur Ausflußröhre weit und die Ausflußröhre kurz ist, so daß also die Reibung fast gar keinen Einfluß hat und demnach das Wasser fast genau mit der Geschwindigkeit ausfließt, die seiner Höhe entspricht, zeigt sich doch eine wesentlich geringere Ausflußmenge. Diese Verringerung rührt her von einer Zusammenziehung des ausfließenden Strahles, welche beginnt, sobald das Wasser die Mündung verläßt, so daß nicht der Querschnitt der Mündung sondern der Querschnitt der dünnsten Stelle des ausfließenden Strahles als Ausflußöffnung anzusehen ist.

Ist die Ausflußöffnung in einer dünnen Wand ohne Ausflußrohr, so ist die wirkliche Ausflußmenge nur 0,6 der berechneten. Bei konischem Ansatzrohre, dessen Form ziemlich genau der Form des sich zusammenziehenden Strahles entspricht, ist die Ausflußmenge so groß, wie berechnet, wenn man den vordersten engsten Querschnitt des Rohres als Ausflußöffnung betrachtet. Ein cylindrisches (kurzes) Ansatzrohr liefert mehr Wasser als die bloße Öffnung von gleichem Querschnitt, jedoch weniger als ein konisches Rohr von gleichem vorderen Querschnitt.

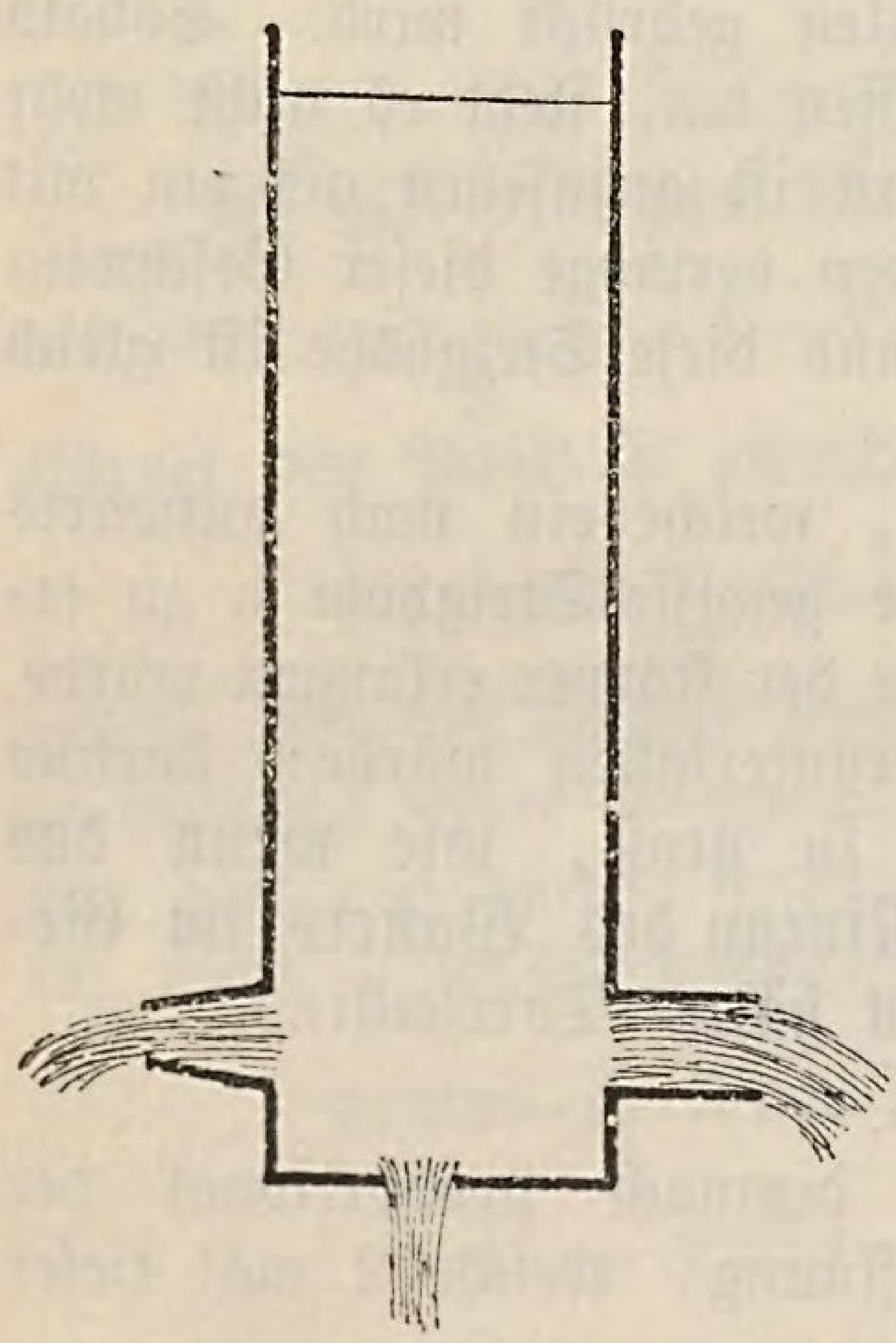


Fig. 333.

Wenn das Wasser aus einer Öffnung fließt, so ist es gleichgültig, ob der das Ausfließen bewirkende Druck herrührt von einer Wassersäule oder von einer anderen Kraft, etwa dem Drucke komprimierter Luft, wie beim Heronsballe oder dem Windkessel einer Feuerspritze. Hat die komprimierte Luft etwa einen Überdruck von 1 Atmosphäre, so ist dieser gleich dem Druck einer Wassersäule von

10 *m* Höhe (genauer 10,33 *m* Höhe = 76 · 13,596 *cm*). Es muß also das unter diesem Überdrucke stehende Wasser so rasch ausfließen, daß es eine Steighöhe von 10,33 *m* erreichen kann, es muß also mit der dieser Steighöhe entsprechenden Geschwindigkeit von $\sqrt{2g \cdot 10{,}33} = 14{,}23\ m$ ausfließen.

Bei einem Überdruck von p Atmosphären ist somit die Ausflußgeschwindigkeit $= \sqrt{2g \cdot p \cdot 10{,}33}\ m$; **die Ausflußgeschwindigkeiten sind den Quadratwurzeln aus den Überdrücken proportional.**

Denkt man sich den Heronsball mit Spiritus (sp. G. = s, etwa = 0,81) beschickt, und diesen auch unter dem Überdrucke von einer Atmosphäre stehend, so entspricht diesem Überdrucke nicht eine Höhe von 10,33 *m*, sondern von $\frac{10{,}33}{s}\ m = \frac{10{,}33}{0{,}81} = 12{,}7\ m$ Spiritus. Es muß also der ausfließende Spiritus eine Steighöhe von $\frac{10{,}33}{s}\ m = 12{,}7\ m$ erreichen. Dies entspricht dem Satze: Die Höhen zweier Flüssigkeitssäulen von verschiedenen sp. G. verhalten sich bei gleichem Bodendrucke umgekehrt wie die spezifischen Gewichte; $10{,}33 : x = 0{,}81 : 1$. Entsprechend der Steighöhe von $\frac{10{,}33}{s}\ m$ muß der ausfließende Spiritus eine Geschwindigkeit haben

$$v = \sqrt{2g\,\frac{10{,}33}{s}\ m} = 15{,}8\ m.$$

Dasselbe gilt von anderen Flüssigkeiten, wie Öl, Quecksilber u. s. w., mit anderen spezifischen Gewichten s′, s″ u. s. w. **Bei demselben Überdrucke verhalten sich die Ausflußgeschwindigkeiten zweier Flüssigkeiten wie umgekehrt die Quadratwurzeln aus ihren spezifischen Gewichten.** Es ist z. B. Quecksilber 13,596mal schwerer als Wasser, also ist seine Ausflußgeschwindigkeit $\sqrt{13{,}596} = 3{,}687$ mal kleiner als die des Wassers bei demselben Drucke. Seine Ausflußgeschwindigkeit muß bei 1 Atm. Überdruck einer Steighöhe von 76 *cm* entsprechen, also

$$v = \sqrt{2\,gh} = \sqrt{2 \cdot 9{,}809 \cdot 0{,}76} = 3{,}861\ m \left(= \frac{14{,}23}{3{,}687}\ m\right).$$

267. Ausflußgeschwindigkeit von Gasen.

Demselben Gesetze gehorchen auch die luftförmigen Körper. Es ist z. B. die gewöhnliche Luft 773mal leichter (0,001293mal schwerer) als Wasser, also ist ihre Ausflußgeschwindigkeit $\sqrt{773} = 27{,}81$ mal größer als die des Wassers. Wasser hat aber bei einem Überdruck von 1 Atm. eine Ausflußgeschwindigkeit von $\sqrt{2g \cdot 10{,}33}$

= 14,23 *m*; also hat Luft, wenn sie in einem Behälter unter einem konstanten Druck von 1 Atmosphäre steht, und von diesem aus in einen luftleeren (und beständig luftleer gehaltenen) Raum ausströmt, eine Ausflußgeschwindigkeit von

$$27{,}8 \cdot 14{,}23 = 396\ m = \sqrt{2\,g\,\frac{10{,}33}{0{,}001293}}\cdot$$

Mit welcher Geschwindigkeit strömt die Luft aus einem Behälter, in dem sie einen konstanten Druck von 5 Atmosphären hat, in die freie Luft aus?

$v = \sqrt{2g \cdot p \cdot \frac{10{,}33}{s}}$; hiebei ist $p = 4$ Atmosphären Überdruck; $s = 0{,}00129 \cdot 5$, weil das sp. G. dieser komprimierten Luft 5 mal größer ist als das der gewöhnlichen Luft (Mariottescher Satz).

Demnach $v = \sqrt{2 \cdot 9{,}809 \cdot 4 \cdot \frac{10{,}33}{0{,}00129 \cdot 5}} = 354\ m.$

Läßt man diese Luft in einen luftleeren Raum ausströmen, so ist der Überdruck = 5 Atmosphären,

$$\text{also } v = \sqrt{2 \cdot 9{,}809 \cdot 5 \cdot \frac{10{,}33}{0{,}00129 \cdot 5}}$$

$$= \sqrt{2 \cdot 9{,}809 \cdot \frac{10{,}33}{0{,}00129}} = 396\ m.$$

Man erkennt, daß die Luft bei jedem Drucke mit gleicher Geschwindigkeit (396 *m*) gegen den luftleeren Raum ausströmt; es strömen also in gleichen Zeiten gleich große Volumina aus; da aber die Dichten und Gewichte derselben sich wie die Drücke verhalten, so folgt, daß die in gleichen Zeiten in den leeren Raum strömenden Luftmengen dem Gewichte nach sich wie die Druckkräfte verhalten.

Es verhalten sich auch die Ausflußgeschwindigkeiten zweier Gase umgekehrt wie die Quadratwurzeln aus ihren spezifischen Gewichten. Da z. B. das sp. G. des Wasserstoffes in bezug auf Luft = 0,06926 ist, so ist dessen Ausflußgeschwindigkeit $\sqrt{0{,}06926} = 0{,}263$ mal kleiner, also 3,8 mal größer, als die der gewöhnlichen Luft.

In welchem Verhältnisse müssen die Ausflußöffnungen für Sauerstoff und Wasserstoff stehen, damit, wenn beide Gase unter demselben (Über-)Drucke stehen, die ausfließenden Mengen gerade Knallgas geben?

Da Wasserstoff 16 mal leichter ist als Sauerstoff, so ist seine Ausflußgeschwindigkeit 4 mal größer als die des Sauerstoffes; es würden also gleichgroße Öffnungen 4 mal mehr Wasserstoff als Sauerstoff liefern. Zu Knallgas ist aber bloß notwendig, daß

Wasserstoff 2 mal mehr (dem Volumen nach) sei, als Sauerstoff, deshalb muß die Öffnung der Röhre des Wasserstoffes 2 mal kleiner, ihr Durchmesser also $\sqrt{2}$ mal kleiner sein als beim Sauerstoff.

268. Bewegung auf der schiefen Ebene.

Hat ein Körper auf der schiefen Ebene schon eine Anfangsgeschwindigkeit in der Richtung der schiefen Ebene = a, so ist, wenn a nach abwärts gerichtet ist:

$$v = a + gt \sin \alpha; \; s = at + \frac{gt^2}{2} \sin \alpha;$$

wenn a nach aufwärts gerichtet ist, so ist:

$$v = a - gt \sin \alpha; \; s = at - \frac{gt^2}{2} \sin \alpha.$$

Er steigt im letzteren Falle so lange, bis

$0 = a - gt \sin \alpha$, also $t = \frac{a}{g \sin \alpha}$, und durchläuft dabei den Weg

$$s = \frac{a^2}{g \sin \alpha} - \frac{g \sin \alpha}{2} \cdot \frac{a^2}{g^2 \sin^2 \alpha}$$

$$s = \frac{a^2}{2 g \sin \alpha}.$$

269. Der schiefe Wurf.

Der schiefe Wurf ist eine sogenannte zusammengesetzte Bewegung, bei welcher nämlich auf einen in Bewegung befindlichen Körper eine Kraft wirkt, deren Richtung mit der Bewegungsrichtung des Körpers einen Winkel bildet. Die durch die Kraft hervorgebrachte Beschleunigung setzt sich mit der schon vorhandenen Geschwindigkeit des Körpers zu einer resultierenden Geschwindigkeit zusammen, deren Größe und Richtung man durch Konstruktion des Geschwindigkeitsparallelogrammes findet, welches analog dem Kräfteparallelogramm gebildet wird.

Der schiefe Wurf war das erste Beispiel einer zusammengesetzten Bewegung, das von Galilei zuerst entwickelt wurde.

Wird ein Körper schräg nach aufwärts geworfen, so beschreibt er bekanntlich eine krummlinige Bahn. Die einzelnen Punkte der Bahn kann man dadurch bestimmen, daß man von jedem Punkte eine vertikale Linie bis zur Erde (bis zu der durch den Anfangspunkt gelegten Horizontalen) zieht, und erstens die Länge dieser Senkrechten, zweitens die Entfernung des Fußpunktes dieser Senkrechten vom Anfangspunkte der Bewegung mißt.

Die Bewegung selbst und auch die Geschwindigkeit muß man sich in zwei Komponenten zerlegen, nach horizontaler und vertikaler Richtung. Wenn also der Körper mit der Anfangsgeschwindigkeit a unter dem Winkel α geworfen wird, so ist es gerade so, als wenn er in horizontaler Richtung eine Geschwindigkeit = a cos α und in vertikaler Richtung eine solche = a sin α hätte.

Wir betrachten die Endgeschwindigkeiten nach t Sekunden: In horizontaler Richtung wird die Geschwindigkeit durch die Schwerkraft nicht beeinflußt, also nicht geändert, sie bleibt gleich groß nach dem Beharrungsvermögen, also $\mathbf{v_h = a \cos \alpha}$. In vertikaler

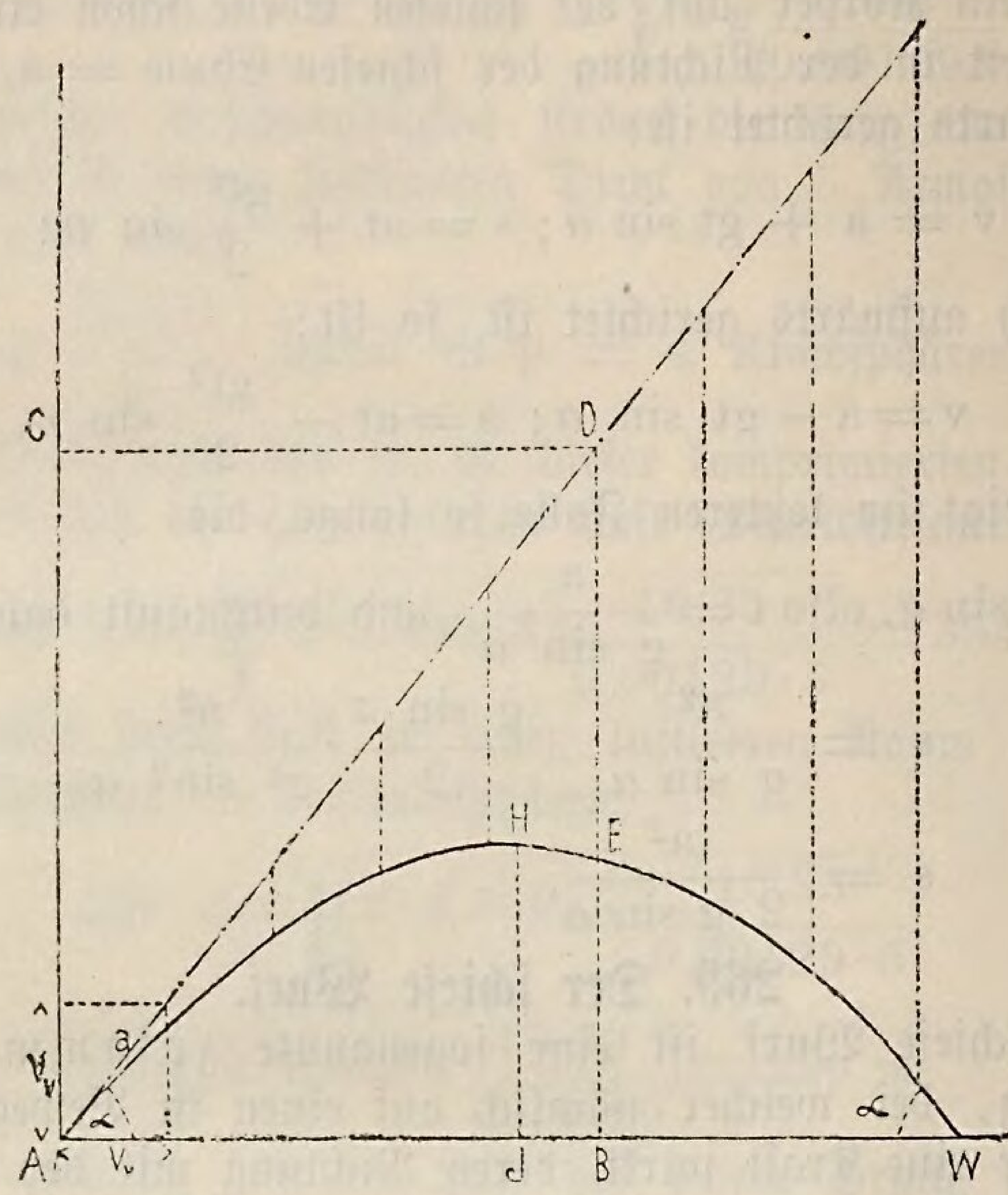


Fig. 334.

Richtung wird die Geschwindigkeit durch die Schwerkraft vermindert in jeder Sekunde um g wie beim senkrechten Wurf; also ist

$$\mathbf{v_v = a \sin \alpha - gt.}$$

Da die horizontale Komponente der Geschwindigkeit unverändert bleibt, die vertikale sich mit der Zeit t ändert, so ändert sich auch die Richtung der Geschwindigkeit, die Richtung, in der sich der Körper bewegt. Bezeichnet man sie mit β, so ist $tg\beta = \frac{v_v}{v_h} = \frac{a \sin \alpha - gt}{a \cos \alpha}$. Wird der Zähler $= 0$, so ist $tg\beta = 0$, also $\beta = 0$, d. h. der Körper läuft horizontal in H. Dies ist der Fall, wenn $a \sin \alpha - gt = 0$, also nach $t = \frac{a \sin \alpha}{g}$ Sekunden. Wird t noch größer, so wird der Zähler und damit auch $tg\beta$ negativ, also β negativ; die Richtung der Bahn geht nicht mehr nach aufwärts, sondern nach abwärts. Der Körper steigt also eine Zeit lang aufwärts, $t = \frac{a \sin \alpha}{g}$ Sekunden, oder auch so

lange, bis $v_v = 0$, also bis seine nach aufwärts gerichtete, vertikale Komponente $= 0$ ist; er hat dann den höchsten Punkt der Bahn erreicht, und sinkt dann nach abwärts. Man nennt den ersten Teil AH den aufsteigenden Ast der Bahn, den andern HW den absteigenden.

Die krumme Linie, die der geworfene Körper beschreibt, ist eine Parabel, AHW, deren Achse vertikal steht (Galilei).

Die wirkliche Größe der Geschwindigkeit, die er in einem bestimmten Punkte der Bahn, also nach bestimmter Zeit hat, setzt sich zusammen als Hypotenuse eines Dreieckes, dessen Katheten v_v und v_h sind, also ist $v = \sqrt{v_v^2 + v_h^2}$

$$v = \sqrt{(a \sin \alpha - gt)^2 + a^2 \cos^2 \alpha}.$$

Auch dieser Wert wird anfangs kleiner, wenn t wächst, aber nur so lange bis $a \sin \alpha - gt = 0$; also nach $t = \frac{a \sin \alpha}{g}$ Sekunden hat er die geringste Geschwindigkeit; es ist dies die Zeit, in welcher er den höchsten Punkt der Bahn erreicht hat. Von da an wird v wieder größer.

Wir untersuchen, wann seine Geschwindigkeit v wieder $= a$ geworden ist; dann muß sein

$$a = \sqrt{(a \sin \alpha - gt^2 + a^2 \cos^2 \alpha}$$

$$a^2 = a^2 \sin^2 \alpha - 2a \sin \alpha \, gt + g^2 t^2 + a^2 \cos^2 \alpha$$

$$0 = -2a \sin \alpha \, gt + g^2 t^2, \text{ also } t = 0 \text{ oder}$$

$$t = \frac{2a \sin \alpha}{g};$$ das ist doppelt so lang als die Zeit, die er zum Erreichen des höchsten Punktes braucht.

Wenn er also im absteigenden Ast eben so lang gelaufen ist, als er zum Durchlaufen des aufsteigenden brauchte, so ist seine Endgeschwindigkeit wieder gleich seiner Anfangsgeschwindigkeit. Die Neigung dieser Endgeschwindigkeit wird gefunden aus $tg\beta = \frac{a \sin \alpha - gt}{a \cos \alpha}$

für $t = \frac{2a \sin \alpha}{g}$; also $tg\beta = \frac{a \sin \alpha - g\frac{2a \sin \alpha}{g}}{a \cos \alpha} = \frac{a \sin \alpha - 2a \sin \alpha}{a \cos \alpha}$ $= \frac{-a \sin \alpha}{a \cos \alpha}$, also $tg\beta = -tg a$. Die Neigung ist dann dieselbe wie am Anfang, nur nach abwärts gerichtet (—).

Wir betrachten die Wegstrecken, die er in horizontaler (s_h) und vertikaler (s_v) Richtung zurücklegt. In horizontaler Richtung hat er die unveränderliche Geschwindigkeit $a \cos \alpha$, legt also in t'' den Weg $\mathbf{S_h = a \cos \alpha \cdot t}$ zurück. (AB). In vertikaler Richtung hat er die Geschwindigkeit $a \sin \alpha$, und legt deshalb den Weg $a \sin \alpha$ zurück nach aufwärts (AC); aber es wirkt die Schwerkraft und diese

bewirkt zugleich einen Weg von $\frac{gt^2}{2}$ nach abwärts (DE); also ist der Weg in vertikaler Richtung gleich der Differenz beider Strecken DB—DE=FB; also

$$\mathbf{S_v = a \sin \alpha\, t - \frac{gt^2}{2}}$$

Wir berechnen, wo sich der Körper befindet, wenn er den höchsten Punkt erreicht hat, also nach $t = \frac{a \sin \alpha}{g}$ Sekunden; es ist dann

$$s_h = a \cos \alpha \cdot \frac{a \sin \alpha}{g} = \frac{a^2 \sin \alpha \cos \alpha}{g}$$

$$s_v = a \sin a \cdot \frac{a \sin \alpha}{g} - \frac{g}{3} \frac{a^2 \sin^2 \alpha}{g^2}$$

$$= \frac{a^2 \sin^2 \alpha}{g} - \frac{a^2 \sin^2 \alpha}{2g}$$

$\mathbf{s_v = \frac{a^2 \sin^2 \alpha}{2g} = W_h}$. Man sagt: die Wurfhöhe HJ=W_h ist proportional dem Quadrat der Anfangsgeschwindigkeit.

Wir berechnen, in welcher horizontalen Entfernung AW der Körper den (horizontalen) Boden wieder erreicht. Er hat den Boden erreicht, wenn seine vertikale Entfernung = 0 ist, also $s_v = 0 = a \sin \alpha\, t - \frac{gt^2}{2}$, also nach $t = \frac{2 a \sin \alpha}{g}$ Sekunden. Der zugehörige horizontale Weg berechnet sich aus

$$s_h = a \cos \alpha\, t \text{ für } t = \frac{2 a \sin \alpha}{g}, \text{ also}$$

$$s_h = a \cos \alpha \cdot \frac{2a \sin \alpha}{g} = \frac{a^2}{g} 2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha$$

$\mathbf{s_h = \frac{a^2 \sin 2\alpha}{g} = Ww}$ (**Wurfweite**). Man sieht, auch die Wurfweite ist proportional dem Quadrate der Anfangsgeschwindigkeit. Da die Zeit bis zur Erreichung der Wurfweite $t = \frac{2a \sin \alpha}{g}$ ist, so ersieht man durch Vergleich mit dem früheren, daß der Körper die horizontale Ebene wieder unter demselben Winkel und mit derselben Geschwindigkeit trifft, mit der er sie verlassen hat.

Wir untersuchen, unter welchem Winkel der Körper (ein Geschoß) mit der Geschwindigkeit a geworfen werden muß, damit die Wurfweite $Ww = \frac{a^2 \sin 2\alpha}{g}$ möglichst groß wird. Es muß

hiebei sin 2α möglichst groß werden; da aber sin 2α höchstens $= 1$ sein kann und dies ist, wenn $2\alpha = 90^0$ ist, so muß $\alpha = 45^0$ sein. Ein unter dem Winkel von 45^0 geschleudertes Geschoß fliegt also am weitesten; dies ist jedoch nur dann der Fall, wenn kein Luftwiderstand vorhanden oder derselbe verhältnismäßig sehr klein ist. Bei Kanonenkugeln ist aber gerade der Luftwiderstand beträchtlich groß, deshalb wird die größte Wurfweite bei circa 30^0 erzielt.

Unter welchem Winkel muß der Körper mit der Geschwindigkeit a geworfen werden, um die Wurfweite w zu erreichen. Aus

$$w = \frac{a^2 \sin^2 2\,\alpha}{g} \text{ berechnet sich}$$

$\sin 2\alpha = \frac{gw}{a^2}$; nun kann man den zugehörigen Winkel $2\,\alpha$ bekanntlich spitz oder stumpf wählen (z. B. $2\alpha = 70^0$ oder 110^0), beide sind um gleich viel von 90^0 verschieden; also erhält man auch 2 Winkel α, (z. B. $\alpha = 35^0$, oder $\alpha = 55^0$) beide sind um gleich viel von 45^0 verschieden. (Schon von Galilei gefunden.) Man kann also mit demselben Geschütze eine Wurfweite auf zweierlei Arten erreichen, durch Flachschuß und Hochschuß.

Beim horizontalen Wurf mit der Anfangsgeschwindigkeit a hat man nach den bisherigen Bezeichnungen:

$$v_h = a;\ v_v = gt \text{ (nach abwärts gerichtet)}$$
$$s_h = at;\ s_v = \tfrac{1}{2}\, gt^2 \text{ (nach abwärts gerichtet).}$$

Der Körper beschreibt den absteigenden Ast einer Parabel.

Wenn man, während das Schiff fährt, von der Spitze des Mastes einen Stein fallen läßt, so trifft er den Fuß des Mastes. Warum? Wie ist es im Eisenbahnwagen?

Das deutsche Infanteriegewehr M 88, Kaliber 8,9 *mm*, gibt eine Anfangsgeschwindigkeit von 610 *m* und eine größte Schußweite von 3800 *m* bei 32^0 Erhöhung; bis 500 *m* Schußweite ist der höchste Punkt der Bahn nicht über Mannshöhe.

270. Gleichförmig beschleunigte Bewegung.

Wir haben den freien Fall als die einfachste Art einer gleichmäßig beschleunigten oder verzögerten Bewegung betrachtet. Aber stets, wenn eine konstante Kraft auf einen frei beweglichen Körper wirkt, entsteht eine gleichförmig beschleunigte oder verzögerte Bewegung; nur die Größe der Beschleunigung, die beim freien Falle $= g = 9{,}809$ *m* ist, hat andere Werte, welche von der Größe der wirksamen Kraft und von der Größe der zu bewegenden Masse abhängen.

Man erhält die nämlichen Gleichungen $v = \varphi t$; $s = \tfrac{1}{2}\varphi t^2$.

Bei Betrachtung des Falles über die schiefe Ebene haben wir gefunden, daß die Beschleunigung direkt proportional der Kraft ist, und bei der Atwoodschen Fallmaschine, daß sie umge-

kehrt proportional der Masse ist. Wenn also eine Kraft von P *kg* auf eine Masse von Q *kg* wirkt, so findet man die Beschleunigung durch Vergleich mit der Beschleunigung beim freien Falle. Beim freien Falle wirkt nämlich die Kraft von 1 *kg* auf die Masse von 1 *kg* und bewirkt eine Beschleunigung = g; wirkt also die Kraft von P *kg*, so ist die Beschleunigung P mal größer, also = P · g; wirkt sie aber nun nicht bloß auf die Masse von 1 *kg*, sondern auf die Masse von Q *kg*, so ist die Beschleunigung Q mal kleiner, also

$$\varphi = \frac{P \cdot g}{Q}.$$

Man ist nun nicht gewohnt, das *kg* als Masseneinheit zu nehmen, wenn man die Bewegung der Masse betrachtet; das *kg* (resp. g) ist wohl die Masseneinheit für das bürgerliche Leben und auch für die Physik, sofern man die Masse nur als etwas ruhendes, stoffliches betrachtet. Betrachtet man aber die Masse unter dem Einfluß einer Kraft, welche ihr eine Bewegung erteilt, als etwas träges, zu beschleunigendes, so benützt man folgende Massendefinition: Masseneinheit ist diejenige Masse, welche durch die Krafteinheit (1 *kg*) in der Zeiteinheit (1 Sekunde) eine Geschwindigkeitseinheit (1 *m* pro 1") erhält. Da nun die Masse eines Kilogramms von der Krafteinheit (1 *kg*) in 1" eine Geschwindigkeit von g = 9,809 *m* erhält (freier Fall) so muß diejenige Masse, welche bloß 1 *m* Geschwindigkeit erhält, offenbar g mal größer sein als die Masse eines Kilogramms. Also die Masse von g *kg* repräsentiert eine Masseneinheit; man findet daher die Masse eines Körpers ausgedrückt in Masseneinheiten, wenn man sein Gewicht, ausgedrückt in *kg* durch g dividiert. Z. B. ein Körper von 64,5 *kg* Gewicht hat eine Masse von $\frac{64,5}{9,809} = 7,575$ Masseneinheiten. Wiegt ein Körper Q *kg*, so ist die Anzahl seiner Masseneinheiten $M = \frac{Q}{g}$.

Die Masseneinheit bekommt durch die Krafteinheit die Beschleunigungseinheit, also bekommen M Masseneinheiten durch K *kg* Kraft eine Beschleunigung $\varphi = \frac{K}{M}\, m$; Beschleunigung $= \frac{\text{Kraft}}{\text{Masse}}$.

Man bekommt eine gute Vorstellung von dieser Masseneinheit, wenn man eine Masse von 10 *kg* (ca.) auf eine schiefe Ebene von der Neigung 1:10 legt; auf sie wirkt beschleunigend nur eine Kraft von 1 *kg* und erteilt ihr eine Beschleunigung von 1 *m*.

Beispiele: Auf einen Eisenbahnzug von 2000 Ztr. Gewicht wirkt eine Zugkraft von 1800 *kg*; welche Beschleunigung bekommt er?

$$\text{Masse} = \frac{2000 \cdot 50}{10} = 10\,000 \text{ Masseneinh. ca}; \ \varphi = \frac{1800}{10000}\, m = 18\, cm.$$

Auf eine Kanonenkugel von 360 *kg* Gewicht wirkt der Druck der Pulvergase mit der Kraft von 1 400 000 *kg*; welche Beschleunigung bekommt sie, wie lange braucht sie, um das Rohr von 4 *m* Länge zu durchlaufen, und mit welcher Geschwindigkeit verläßt sie es?

Masse $= \frac{360}{10} = 36$ Masseneinh. (ca.); $\varphi = \frac{1\,400000}{36} = m\ 38900\ m.$

Nun ist aus $s = \frac{1}{2}\varphi t^2$, $4 = \frac{1}{2} \cdot 38900\ t^2$, $t = 0{,}0144$ Sek.

$$v = \varphi t = 38900 \cdot 0{,}0144 = 560\ m.$$

Hat der Körper schon die Geschwindigkeit a, wenn die Kraft zu wirken anfängt, so erhält man analog die Gleichungen

$$v = a + \varphi t;\ s = at + \frac{1}{2}\varphi t^2$$

Die nämliche Ableitung gilt für die gleichförmig verzögerte Bewegung, welche dann eintritt, wenn nur auf eine Masse M, welche die Geschwindigkeit a hat, eine Kraft P verzögernd einwirkt. Es ist die Verzögerung

$$\varphi = \frac{P}{M} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Masse}},$$

$$v = a - \varphi t,\ s = at - \frac{1}{2}\varphi t^2.$$

Der Körper bewegt sich bis $t = \frac{a}{\varphi}$ und legt den Weg S zurück.

$$S = \frac{a^2}{2\varphi}.$$

271. Zentralbewegung.

Ein Körper habe eine gewisse Geschwindigkeit und werde zugleich von einer Kraft angezogen, die stets von einem gewissen Punkte (Zentrum) ausgeht, welcher nicht in der Richtung der vorhandenen Geschwindigkeit liegt; der Körper sei sonst frei beweglich; wir untersuchen seine Bewegung.

Es sei AB die Geschwindigkeit des Körpers und stelle zugleich den Weg vor, welchen der Körper in einem kleinen Zeitteilchen durchlaufen würde; es sei dann AD der Weg, welchen der Körper infolge der von C aus wirkenden Kraft (Zentralkraft) zurücklegen würde, so setzen sich beide Wege nach dem Gesetze der Zusammensetzung der Bewegung zusammen, und der Körper durchläuft die Diagonale AA′. Im nächsten Zeitteilchen behält er die Geschwindigkeit bei, die er im ersten Zeitteilchen hatte, nämlich AA′, käme also infolge dieser Geschwindigkeit von A′ nach B′, wobei A′B′ = AA′; zugleich wirkt aber die Zentralkraft und würde den Körper von A′ nach D′ bringen; der Körper bewegt sich wieder längs der Diagonale A′ A″

und kommt nach A″. Im nächsten Zeitteilchen behält er diese Geschwindigkeit A′ A″ bei, würde also von A″ nach B″ kommen, aber wieder wirkt die Zentralkraft, und so geht es fort. Der Körper legt also den Weg AA′A″ A‴ . . . . . zurück. Wenn wir nun wie wir eigentlich sollten, die Zeitteilchen, während welcher wir die Bewegung immer als gleichmäßige betrachten, uns sehr klein (unendlich klein) denken, so beschreibt der Körper nicht eine gebrochene Linie, sondern eine krumme Linie um das Zentrum, weshalb diese Bewegung Zentralbewegung genannt wird.

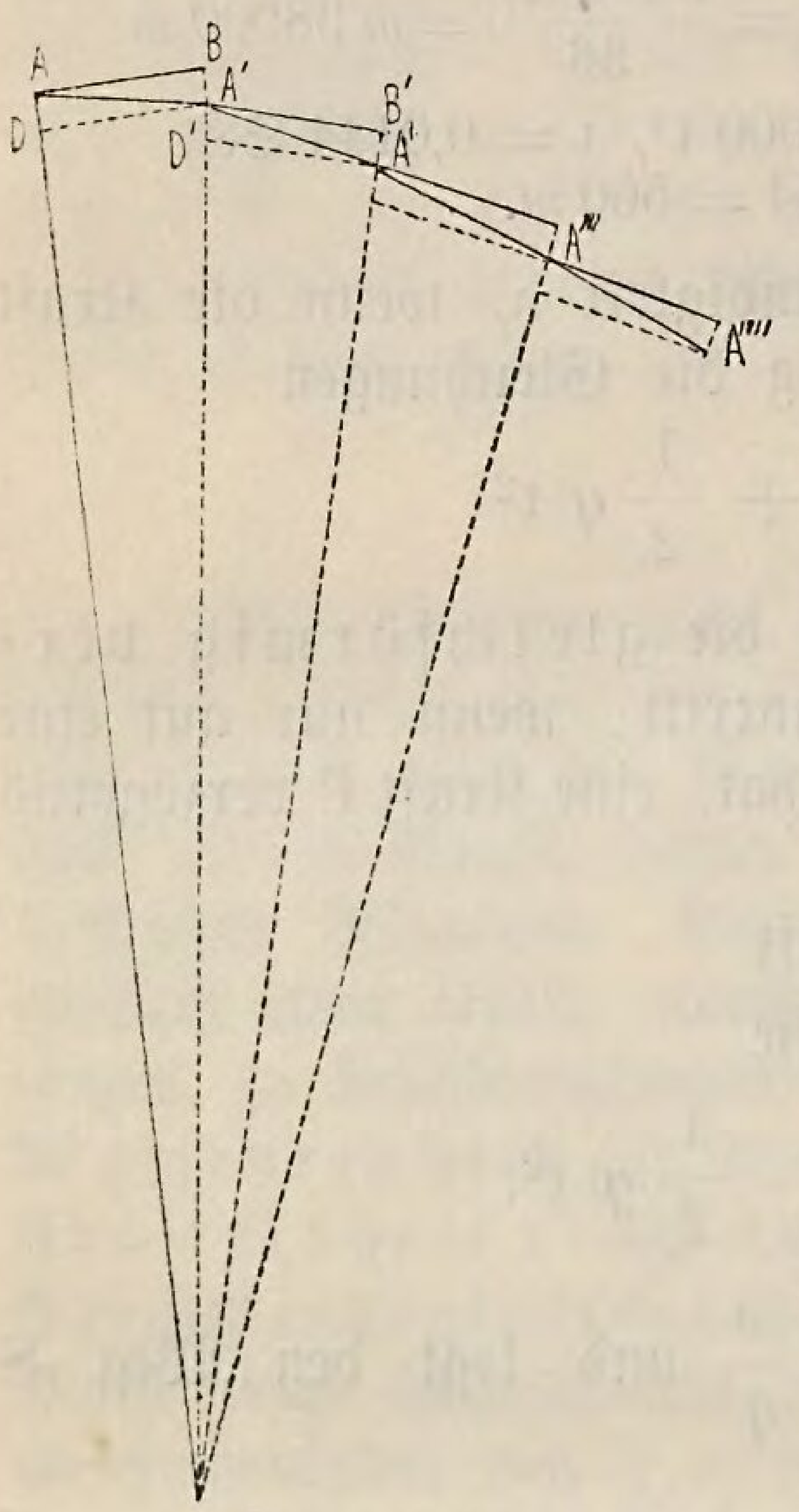


Fig. 335.

272. Kreisbewegung.

Wir können nur diejenige Art von Zentralbewegung elementar behandeln, bei welcher der Körper um das Kraftzentrum einen Kreis (von Radius r) mit gleichförmiger Geschwindigkeit (v) durchläuft; denn dabei können wir ableiten, wie groß die Zentralkraft F und die von ihr in der Richtung auf das Zentrum hin hervorgebrachte Beschleunigung f, Zentralbeschleunigung, sein muß, damit der Körper auf der Kreisbahn bleibe.

Ist der Körper in irgend einem Punkte A seiner Bahn, so ist dort die Richtung seiner Geschwindigkeit gleich der Richtung der Tangente, er würde also in einer gewissen Zeit t den Weg AB = vt durchlaufen. In derselben Zeit würde er infolge der Zentralkraft, welche ihm eine Beschleunigung f erteilt, einen Weg AD = $\frac{1}{2}$ ft² durchlaufen. Soll nun der Körper durch das Zusammenwirken beider Ursachen auf dem Kreise bleiben, so muß die Diagonale beider Bewegungselemente, nämlich AA′ selbst wieder zu einem Punkte des Kreises führen. A′ liegt aber auf dem Kreis, wenn AA′² = 2r·AD. Da nun AA′ für recht kleine Bewegungen, (kleinste Werte von t) mit AB = vt vertauscht werden kann, und AD = $\frac{1}{2}$ft² ist, so erhält man die Gleichung

$$v^2 t^2 = 2r \cdot \tfrac{1}{2} f t^2, \text{ oder}$$

$$f = \frac{v^2}{r}.$$

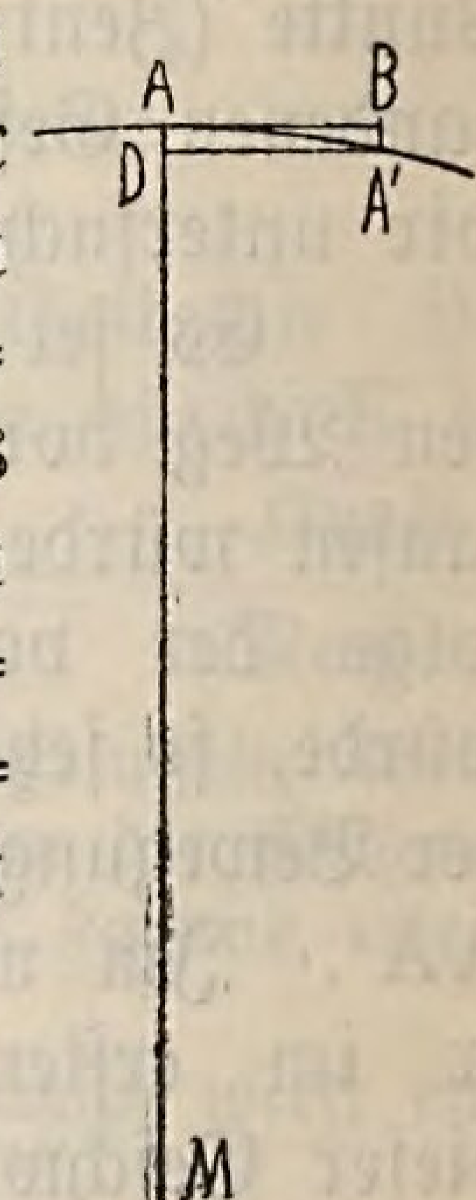


Fig. 336.

D. h. wenn die Zentralbeschleunigung gerade diesen Wert hat, so ist

A′ wieder auf dem Kreis; hat f einen größeren oder kleineren Wert, so liegt der zweite Punkt (A′) innerhalb oder außerhalb der Kreisperipherie.

Behält f den angegebenen Wert, so liegt nicht nur A′ sondern jeder folgende Punkt der Bahn auf dem Kreis, A beschreibt die Kreisbahn mit gleichförmiger Geschwindigkeit.

Soll also ein Körper einen Kreis vom Radius r mit gleichförmiger Geschwindigkeit v durchlaufen, so ist notwendig und hinreichend, daß auf ihn eine vom Zentrum ausgehende oder auf das Zentrum hin gerichtete Kraft wirke, welche ihm eine Beschleunigung erteilt, deren Größe $f = \frac{v^2}{r}$. Die Zentralbeschleunigung ist also bei gleichen Radien den Quadraten der Geschwindigkeit direkt, und bei gleicher Geschwindigkeit den Radien umgekehrt proportional.

Hat der Körper A die Masse M, so muß die Zentralkraft F, damit sie der Masse M die Beschleunigung f erteilen kann, die Größe $F = Mf$ haben; also ist

$$F = \frac{Mv^2}{r}.$$

Die einfachste Art dieser Bewegung erhält man, wenn der Körper A mit dem Punkte M durch einen Faden verbunden ist, und man ihm eine zur Richtung des Fadens senkrechte Geschwindigkeit v erteilt. Er läuft dann, wenn kein Bewegungshindernis (Reibung, Schwere u. s. w.) vorhanden ist, mit stets gleichbleibender Geschwindigkeit in Kreisform um M. Der Faden übt hiebei an dem Körper einen Zug in der Richtung AM und diesen Zug nennt man Zentralkraft oder Zentripetalkraft. Umgekehrt hat der Körper bei dieser Bewegung (Zwangbewegung) das Bestreben, stets in der Richtung der Tangente der Bahn weiterzulaufen und dadurch sich vom Zentrum zu entfernen; er äußert dies Bestreben dadurch, daß er seinerseits am Faden in der Richtung des Fadens zieht (Reaktion); diese Kraft heißt Mittelpunktsfliehkraft oder Zentrifugalkraft. Sie ist offenbar der Zentripetalkraft gleich.

Man bemerke, daß wenn sich die Masse 1 (eine Masseneinheit) auf dem Kreise vom Radius 1 *m* mit der gleichförmigen Geschwindigkeit von 1 *m* in 1″ bewegen soll, auf sie eine Zentralkraft von 1 *kg* wirken muß, welche ihr dann eine Beschleunigung von 1 *m* erteilt.

273. Zentrifugalmaschine.

Die Zentrifugalmaschine hat folgende Einrichtung. Auf einem Brette sind zwei Achsen drehbar und senkrecht befestigt. Die eine Achse trägt ein Rad von großem, die andere eine Welle von kleinem

Durchmesser. Über Rad und Welle läuft ein Riemen. Dreht man das Rad mittels einer Kurbel, so macht die Welle so vielmal mehr Umdrehungen, als ihr Durchmesser kleiner ist; es kann also die Welle leicht in rasche Rotation versetzt werden. Befestigt man nun

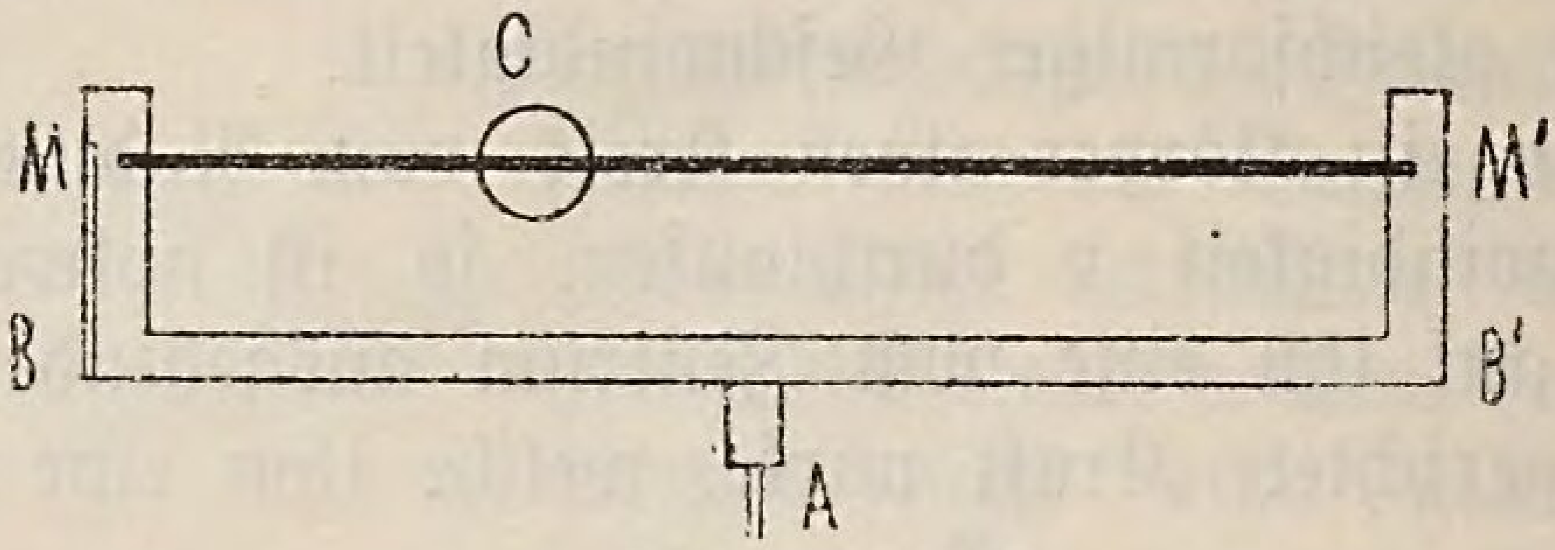


Fig. 337.

auf der Achse der Welle verschiedene Apparate, so unterliegen dieselben der beim Drehen zum Vorschein kommenden Zentrifugal- oder Zentripetalkraft.

Die Zentralbewegung bringt die Zentrifugalkraft hervor, d. h. sie bringt in dem Körper das Bestreben hervor, sich in der Richtung des Radius vom Mittelpunkt zu entfernen.

Befestigt man das Brettchen BB′ in A auf der Maschine, so sieht man, daß die Kugel C, die auf der Messingstange MM′ aufgesteckt ist, beim Umdrehen der Maschine bald nach M hinausrückt, wenn nämlich die Zentrifugalkraft etwas größer als die Reibung geworden ist. Es muß dabei aber bemerkt werden, daß, obwohl die Zentrifugalkraft in der Richtung CM wirkt, der Körper C sich nicht in der Richtung CM bewegt, sondern in der Richtung der Tangente des Kreises, und da diese Bewegung zugleich mit der Umdrehung geschieht, so sieht es so aus, als wenn sich C von C nach M bewegt hätte.

Hievon macht man nützliche Anwendung bei der Honigschleuder, bei der die mit Honig gefüllten Waben auf ein im Innern eines Gefäßes angebrachtes solches Brettchen befestigt werden, und der Honig beim Umdrehen der Schleuder aus den Waben fließt, ohne sie zu zerstören; die geleerten Waben werden dann den Bienen zur neuen Füllung wieder in den Bau gestellt. Ebenso die Zentrifugaltrockenmaschine, die Syrupschleuder bei der Zuckerfabeikation und die gewöhnliche Schleuder.

Wenn der Eisenbahnzug im raschen Fahren eine starke Kurve beschreibt, so werden wir durch die Zentrifugalkraft nach der äußeren Seite der Krümmung hingedrückt, schwanken nach dieser Seite des Waggons und können, wenn wir außen am Wagen, oder an der nur angelehnten Seitenthüre stehen, sogar leicht hinausfallen.

Da in dem Ausdruck für die Zentrifugalkraft $F = \frac{mv^2}{R}$

im Zähler die Masse m steht, so folgt, daß die Zentrifugalkraft der Masse proportional ist. Dies erkennt man an folgendem Versuche: Auf die Messingstange des vorher beschriebenen Apparates werden zwei Messingkugeln von verschiedenem Gewicht gesteckt, durch einen Faden verbunden und so gestellt, daß beide in gleicher Entfernung vom Mittelpunkte sich befinden, dann haben beide dasselbe v und R, bloß die Masse m ist verschieden. Man bemerkt beim Umdrehen, daß die größere Kugel nach auswärts geht und die kleinere nach ihrer Seite hin mitnimmt.

Befestigt man auf der Zentrifugalmaschine ein drehrundes Gefäß mit etwas Wasser, so setzt sich bei jedem Wasserteilchen die Zentrifugalkraft mit der Schwerkraft zu einer Resultierenden zusammen, welche schräg nach außen gerichtet ist; deshalb bleibt die Oberfläche des Wassers nicht horizontal, sondern sie krümmt sich so, daß in jedem Punkte diese Resultierende senkrecht zur Wasseroberfläche steht; je weiter die Fläche vom Zentrum entfernt ist, desto steiler wird sie. Da bei raschem Drehen diese Resultierende nahezu horizontal wird, so sammelt sich das Wasser in fast vertikaler Schichte an der Wand des Gefäßes. Wie in einem Gefäß mit zwei Flüssigkeiten die schwerere sich unten sammelt, weil 1 *ccm* mehr Masse enthält und deshalb mehr Gewicht hat, so sammelt sich beim Drehen, da die Richtung der auf die Moleküle wirkenden Kraft nahezu horizontal ist und nach außen gerichtet ist, die schwerere Flüssigkeit nach außen, um so mehr als 1 *ccm* von ihr mehr Masse enthält und deshalb mehr Zentrifugalkraft bekommt.

Davon macht man eine nützliche Anwendung bei der Zentrifuge zur Entrahmung der Milch. Wenn man nämlich Milch in ein cylindrisches Gefäß bringt und dasselbe in rasche Rotation versetzt, so legt sich die Milch parallel den Wänden nahezu senkrecht. Die Fettkügelchen der Milch gehen nun vermöge ihres geringeren spezifischen Gewichtes nach einwärts so daß in kurzer Zeit (10 Min.) die magere Milch sich von dem Rahm geschieden hat, erstere weiter nach außen, letztere weiter nach innen; es kann dann leicht der Rahm abgeschöpft werden.

Aus dem Ausdruck $F = \frac{mv^2}{R}$ erkennt man ferner, daß die Zentrifugalkraft bei gleichem Radius dem Quadrat der Geschwindigkeit proportional ist, also bei doppelt so großer Geschwindigkeit 4mal so groß wird, sowie daß die Zentrifugalkraft bei gleicher Geschwindigkeit dem Radius umgekehrt proportional ist.

274. Abhängigkeit der Zentrifugalkraft von Masse und Umlaufszeit.

Wird bei der Drehung der ganze Kreis $2R\pi$ in der Zeit T″ durchlaufen mit der Geschwindigkeit v, so ist $vT = 2R\pi$, also $v = \frac{2R\pi}{T}$; setzt man dies in den Ausdruck für F ein, so wird

$$F = \frac{4\pi^2 RM}{T^2}.$$

Man erkennt daraus, daß bei gleicher Umlaufszeit die Zentrifugalkraft dem Radius proportional ist, und bei gleichem Radius dem Quadrat der Umlaufszeit umgekehrt proportional ist, sowie, daß, wenn die Masse eines Körpers bekannt ist, man sofort die Zentripetalkraft angeben kann, die notwendig ist, damit er um einen Mittelpunkt in gegebenem Abstand in gegebener Zeit rotiert.

Ferner folgt: Wenn bei gleichen Umlaufszeiten zwei verschiedene Massen m_1 und m_2 sich in solchen Entfernungen vom Mittelpunkte befinden, daß diese Abstände R_1 und R_2 sich verhalten wie umgekehrt die Massen, also daß $R_1 : R_2 = m_2 : m_1$, so daß $m_1 R_1 = m_2 R_2$, so sind die Zentrifugalkräfte einander gleich. Steckt man auf den Stab des vorher beschriebenen Apparates zwei Kugeln von verschiedenem Gewicht, verbindet sie durch eine Schnur und stellt sie so, daß bei gespannter Schnur sich die Gewichte verhalten wie umgekehrt ihre Abstände vom Drehungsmittelpunkt, so daß also der Drehpunkt der Schwerpunkt beider Massen ist, so bleiben bei jeder Rotationsgeschwindigkeit beide Kugeln in Ruhe, weil sie gleiche Zentrifugalkräfte bekommen.

Da F : M die Beschleunigung f ist, welche die Masse M durch die Kraft F bekommt, so ist diese Zentralbeschleunigung $f = \frac{4\pi^2 R}{T^2}$.

Hieran knüpfen wir folgende Betrachtung. Befindet sich ein Körper (etwa von der Masseneinheit) auf der Erdoberfläche, so bekommt er eine Beschleunigung $= g = 9{,}809\ m$. Befindet er sich aber in einer Entfernung gleich der des Mondes, und läuft er in dieser Entfernung um die Erde kreisförmig, wie es ja der Mond nahezu wirklich thut, so braucht er dazu die Zeit = 27 Tg. 7 Std. 43′ 11″ (siderischer Monat). Wir können nun die Zentralbeschleunigung, die hiezu erforderlich ist, berechnen aus $f = \frac{4\pi^2 \cdot R}{T^2}$, wenn wir $T = 2\,360\,501''$ und $R = 382\,000\,000$ m setzen. Es ist dann $f = \frac{4 \cdot 3{,}14^2 \cdot 382\,000\,000}{2\,360\,500^2} = 0{,}00274$ m.

So groß ist also die Zentripetalbeschleunigung per Sekunde, wenn der Körper sich in der Entfernung des Mondes befindet und ebenso rasch kreisförmig um die Erde läuft wie der Mond. Vergleicht man diese Zentralbeschleunigung mit der Beschleunigung g, welche der Körper auf der Erdoberfläche bekommt, also mit g = 9,809 m, so findet man, daß sie nahezu $3600 = 60^2$ mal kleiner ist, und da die Entfernung des Mondes von der Erde 60 mal größer ist als der Erdradius, so schließt man: Die Kraft, die den Mond zwingt, kreisförmig um die Erde zu laufen in der Zeit von 27 Tg. 4 Std. u. s. w. ist dieselbe Kraft, welche den Körper auf der Erdoberfläche zum Fallen bringt, nur nimmt diese Kraft ab, wie das Quadrat der Entfernung zunimmt. Durch solche Betrachtungen kam Newton zur Entdeckung des nach ihm benannten Newtonschen Gravitationsgesetzes, welches heißt: Die Anziehungskraft, Attraktion, der Erde wirkt nicht bloß auf der Erdoberfläche, sondern auch in beliebiger Entfernung, und die Kraft nimmt ab, wie das Quadrat der Entfernung zunimmt.

Indem dann Newton das Gesetz auch auf die Bewegung anderer Himmelskörper anwandte, also auf die Bewegung der Planeten um die Sonne, der Monde um die Planeten, erkannte er, daß es ganz allgemein gültig sei, und daß die Anziehung auch dem Produkt der beiden sich anziehenden Massen proportional ist. Also: **Die gegenseitige Anziehung zweier Himmelskörper ist proportional dem Produkte beider Massen und umgekehrt proportional dem Quadrat ihres Abstandes.**

Dieses Gesetz der allgemeinen Massenanziehung oder der Universalgravitation ist das Grundgesetz, aus welchem sich die Bewegungen sämtlicher Himmelskörper erklären und berechnen lassen, aus ihm folgen auch die Kepplerschen Gesetze der Planetenbewegung, die wir im Folgenden betrachten.

275. Planetenbewegung.

Die Sonne als Zentralkörper übt auf jeden Planeten eine Anziehung aus, welche sich nach dessen Abstand richtet. Da der Planet zugleich eine gewisse Geschwindigkeit besitzt, so macht er stets eine Bewegung, welche die Resultierende ist aus der ihm eigentümlichen Geschwindigkeit und der Attraktion der Sonne. Man findet durch Rechnung und sieht in der Natur bestätigt an den Planetenbahnen, daß die Bahn im allgemeinen eine Ellipse ist, in deren einem Brennpunkte sich die Sonne befindet.

Betrachten wir den Planeten gerade in dem Punkte seiner Bahn, in welchem seine Richtung senkrecht steht auf der Richtung nach der Sonne, und hat er in diesem Punkte eine Geschwindigkeit, die gerade seinem Abstand und der daraus sich ergebenden Zentral-

beschleunigung entspricht, so beschreibt er genau einen Kreis; ist aber die ihm eigentümliche Geschwindigkeit größer oder kleiner, so beschreibt er eine Ellipse.

Nach dem ersten Kepplerschen Gesetze beschreibt der Planet seine Bahn derart, daß die in gleichen Zeiten von dem zur Sonne führenden Radius beschriebenen Flächenräume gleich groß sind. Deshalb bewegt sich der Planet in der Sonnennähe (Perihelium) rascher als in der Sonnenferne (Aphelium).

Die Planetenbahnen sind nun thatsächlich alle sehr schwach gedrückte Ellipsen, von geringer Exzentrizität, nahezu kreisförmig.

Betrachten wir die Planetenbahnen als kreisförmig, so berechnet sich die Umlaufszeit eines Planeten aus $f = \frac{4\pi^2 R}{T^2}$ als $T = \sqrt{\frac{4\pi^2 R}{f}}$; die eines anderen, der in der Entfernung R′ ist und eine Beschleunigung f′ bekommt, ist also
$T' = \sqrt{\frac{4\pi^2 R'}{f'}}$. Durch Division beider Gleichungen bekommt man
$\frac{T^2}{T'^2} = \frac{Rf'}{f \cdot R'}$; nun ist aber nach dem Newtonschen Attraktionsgesetz:
$f : f' = R'^2 : R^2$; dies eingesetzt gibt:
$\frac{T^2}{T'^2} = \frac{R^3}{R'^3}$, und das ist das dritte Kepplersche Gesetz, daß nämlich die Quadrate der Umlaufszeiten zweier Planeten sich verhalten wie die dritten Potenzen ihrer mittleren Abstände von der Sonne. Die Umlaufszeiten der Planeten sind also nicht abhängig von ihrer Masse, sondern nur von ihrer (mittleren) Entfernung von der Sonne.

276. Pendel.

Hängt man einen schweren Körper an einem Faden auf, so bleibt er in Ruhe, wenn der Faden vertikal ist, wird der Körper aber etwas seitwärts gerückt um den Winkel α (Elongation), so zerlegt sich die auf den Körper wirkende Schwerkraft in die zwei Komponenten $P = Q \sin \alpha$, und $S = Q \cos \alpha$. Die zweite, S, spannt den Faden und bringt keine Bewegung hervor, die erste P wirkt in der Richtung, in der sich der Körper bewegen kann, sie erteilt also dem Körper eine Geschwindigkeit, und er bewegt sich deshalb gegen die Mitte zu. Da hiebei der Winkel α immer kleiner wird, so wird die Komponente P, welche die Bewegung hervorbringt, immer kleiner und ist $= 0$ geworden, wenn der Punkt in der Mitte D angekommen ist. Die Bewegung des Punktes ist

also keine gleichförmig beschleunigte Bewegung, da die Kraft beständig ihre Größe und Richtung ändert, und kann mit den Hilfsmitteln der Elementarmathematik allein nicht abgeleitet werden. In D angekommen, hat der Körper seine größte Geschwindigkeit und bewegt sich vermöge derselben über D hinaus nach der anderen Seite. Durch die nun eintretende Zerlegung der Schwerkraft kommt aber eine Komponente P′ zum Vorschein, welche nun der Bewegung entgegenwirkt; deshalb wird die Bewegung auf dieser Seite verlangsamt oder verzögert, ebenso wie sie auf der anderen Seite beschleunigt wurde. Der Körper verliert also seine Geschwindigkeit und erreicht eine Entfernung, Elongation, welche ebenso groß ist, als die Elongation auf der andern Seite war. Die Bewegung von E nach E′ nennt man eine Schwingung. Aus denselben Gründen wie vorher macht er nun eine eben solche Schwingung von E′ nach E und so fort.

Einen solchen schwingenden Körper nennt man ein Pendel und zwar ein mathematisches Pendel, wenn der schwere Körper bloß ein Punkt und der Faden gewichtlos ist; es wird annähernd dargestellt durch eine Bleikugel, welche an einem möglichst dünnen Faden hängt und sonst keinen Widerstand findet.

Bei solchen Pendeln findet man folgende Gesetze: Die Schwingungsdauer ist unabhängig von der Elongation, so lange letztere selbst nur ziemlich klein ist (Galilei). Die Schwingungsdauer ist proportional der Quadratwurzel aus der Pendellänge; $t_1 : t_2 = \sqrt{l_1} : \sqrt{l_2}$. Ein 2 mal (4 mal) längeres Pendel braucht also zu einer Schwingung $\sqrt{2}$, (2) mal mehr Zeit.

Die Anzahl der Schwingungen, welche ein Pendel in einer gewissen Zeit, etwa einer Minute, ausführt, ist aber offenbar umgekehrt proportional der Dauer einer Schwingung $t_1 : t_2 = n_2 : n_1$. Demnach sind die Schwingungszahlen zweier Pendel den Quadratwurzeln aus den Pendellängen umgekehrt proportional, also $t_1 : t_2 = n_2 : n_1 = \sqrt{l_1} : \sqrt{l_2}$.

Macht man also ein Pendel 2 mal (4 mal) länger, so macht es in derselben Zeit $\sqrt{2}$ mal (2 mal) weniger Schwingungen (Galilei).

Die Dauer einer Pendelschwingung wird dargestellt durch die Formel $t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$. Die Schwingungsdauer hängt nämlich auch von der Größe der auf den Körper wirkenden Kraft, also auch von der durch diese Kraft hervorgebrachten Beschleunigung g ab. Wird nämlich die Kraft Q größer, so wird auch die Komponente P größer, also die Bewegung rascher und somit die Schwingungsdauer kürzer;

es ist die Schwingungsdauer umgekehrt proportional der Quadratwurzel aus der Kraft resp. der Beschleunigung.

277. Das physische Pendel.

Ein physisches Pendel ist jeder Körper, der in einem Punkte so aufgehängt ist, daß sein Schwerpunkt vertikal unter dem Aufhängepunkte liegt und nun etwas aus dieser Lage gebracht wird. Die gewöhnlich bei Uhren verwendeten Pendel bestehen aus einer am oberen Endpunkte drehbar befestigten Stange und einem am unteren Ende befestigten schweren Körper von Kugel- oder Linsenform. Unter der Pendellänge eines solchen Pendels ist zu verstehen die Länge eines mathematischen Pendels, das eben so rasch schwingt wie das physische Pendel. Jeder Punkt des physischen Pendels ist, da er mit dem Aufhängepunkte verbunden ist, anzusehen als ein mathematisches Pendel, dessen Schwingungsdauer von seinem Abstand vom Drehpunkt abhängt. Da nun die Punkte des physischen Pendels verschiedene Abstände vom Aufhängpunkte haben, so versuchen sie mit verschiedener Geschwindigkeit zu schwingen; da sie aber fest mit einander verbunden sind, so kann das ganze Pendel nur eine mittlere Bewegung machen.

Unter Sekundenpendel versteht man ein Pendel, das in einer Sekunde eine Schwingung macht, setzt man $t = 1$, so ist $1 = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$; also $l = \frac{g}{\pi_2}$ ist die Länge des Sekundenpendels. Diese Länge ist bloß von der Beschleunigung g der Schwere abhängig, man kann also eine Größe durch die andere bestimmen. Mißt man die Länge des Sekundenpendels, so kann man daraus g berechnen, und es ist dies die genaueste Methode zur Bestimmung von g. Nun ist aber die Schwerkraft am Äquator kleiner als bei uns, einerseits weil wegen der Abplattung der Erde die Punkte am Äquator weiter vom Erdmittelpunkte entfernt sind als die Punkte in höherer Breite, andererseits weil die Zentrifugalkraft, die durch die Achsendrehung der Erde hervorgebracht wird, auch am Äquator größer ist und die Schwerkraft um mehr vermindert. Gegen die Pole nimmt die Schwerkraft noch weiter zu und die Zentrifugalkraft nimmt ab. Deshalb sind sowohl die Längen des Sekundenpendels als die Größe von g abhängig von der geographischen Breite.

Man fand

Geographische Breite.	Länge des Sekundenpendels.	Wert von g.
0°	0,99103	9,78103
45°	0,99356	9,80606
90°	0,99610	9,83109

Auch bei der Erhebung über die Meeresoberfläche ändert sich die Länge des Sekundenpendels und der Wert von g aus denselben Gründen; beide nehmen ab.

278. Stoß.

Wenn von einem Körper A eine Kraft ausgeht, welche auf einen Körper B wirkt, so unterliegt auch A selbst dem Einflusse dieser Kraft; wird B durch diese Kraft nach der einen Richtung bewegt, so wird A dadurch nach der anderen Richtung bewegt; man nennt dann die Wirkungen auf B und A **Wirkung** und **Gegenwirkung**. Ist z. B. eine elastische Feder zwischen zwei Kugeln A und B gespannt und man läßt beide zugleich los, so bewegen sich beide nach entgegengesetzten Richtungen; oder ist Wasser oder Dampf in einem Gefäße, so drückt es auf die eine Gefäßwand, ebenso aber auch auf die gegenüberliegende; der Magnet zieht das Eisen an, er wird aber auch selbst vom Eisen angezogen; ein Gewicht drückt auf den Tisch, umgekehrt drückt aber auch der Tisch das Gewicht nach oben, da in ihm durch den Druck eine elastische Kraft entsteht. In all diesen Fällen sind immer die zwei nach entgegengesetzten Richtungen wirkenden Kräfte einander gleich; wirken sie dabei auf gleiche, frei bewegliche Massen, so erhalten diese dieselbe Geschwindigkeit, wirken sie auf verschiedene Massen, so erhalten sie verschiedene Geschwindigkeiten, welche sich verhalten umgekehrt wie die Massen, denn die gleichen Kräfte bringen Beschleunigungen hervor, welche sich umgekehrt wie die Massen verhalten,

$$m_1 : m_2 = g_2 : g_1;$$

die erlangten Geschwindigkeiten sind aber den Beschleunigungen proportional,

$$g_2 : g_1 = v_2 : v_1, \text{ also folgt}$$

$m_1 : m_2 = v_2 : v_1$ d. h. **die in derselben Zeit erlangten Geschwindigkeiten sind den Massen umgekehrt proportional.**

Solche Wirkungen entstehen beim Stoße, d. h. beim Zusammentreffen zweier in Bewegung befindlicher Massen. Sind dieselben unelastisch, so tritt infolge des beim Zusammentreffen entstehenden gegenseitigen Druckes eine Geschwindigkeitsänderung und eine bleibende Formveränderung ein, bis beide Massen dieselbe Geschwindigkeit haben. Es seien die Massen m_1 und m_2, ihre Geschwindigkeiten v_1 und v_2, beide nach derselben Seite gerichtet, und $v_2 > v_1$, so daß das folgende m_2 das vorangehende m_1 einholt; es sei dann v die schließliche gemeinschaftliche Geschwindigkeit, so bekommt m_1 einen Geschwindigkeitszuwachs $= v - v_1$ und m_2 einen Geschwindigkeits-

verlust $= v_2 - v$, beide verhalten sich umgekehrt wie die Massen, also $v - v_1 : v_2 - v = m_2 : m_1$; hieraus ist

$$v = \frac{v_1 m_1 + v_2 m_2}{m_1 + m_2}.$$

Laufen die Massen gegen einander, so ist eine Geschwindigkeit, etwa v_2 als negativ zu nehmen, also ist

$$v = \frac{v_1 m_1 - v_2 m_2}{m_1 + m_2}.$$

Sind die Massen einander gleich, so ist im ersten Falle $v = \frac{1}{2}(v_1 + v_2)$, im zweiten Falle $v = \frac{1}{2}(v_1 - v_2)$, ist hiebei $v_1 = v_2$, so ist $v = 0$, d. h. treffen gleiche Massen mit gleichen Geschwindigkeiten auf einander, so heben sich ihre Bewegungen auf, sie sind nach dem Stoße beide in Ruhe.

Wenn zwei elastische Massen auf einander stoßen, so tritt auch eine Zusammendrückung der getroffenen Stellen ein und eine Geschwindigkeitsänderung, bis beide Körper dieselbe Geschwindigkeit haben; diese Zusammendrückung ist aber, wenn hiebei die Elastizitätsgrenze nicht überschritten wird, keine bleibende, sondern die einwärts gedrückten Stellen kehren in die ursprüngliche Lage zurück: dabei bringen sie einen gegenseitigen Druck hervor, welcher den Massen wieder eine Geschwindigkeitsveränderung erteilt, welche ebenso groß ist wie die beim Zusammendrücken erhaltene Geschwindigkeitsänderung.

Es seien die Massen m_1 und m_2, ihre Geschwindigkeiten v_1 und v_2, so ist die Geschwindigkeitsänderung beim Zusammendrücken wie vorher $v - v_1$ beim ersten und $v_2 - v$ beim zweiten, wobei

$$v = \frac{v_1 m_1 + v_2 m_2}{m_1 + m_2}.$$

Beim Ausdehnen erhält jeder Körper dieselbe Geschwindigkeitsänderung, deshalb hat m_1 die schließliche Geschwindigkeit

$$c_1 = v_1 + 2\left(\frac{v_1 m_1 + v_2 m_2}{m_1 + m_2} - v_1\right) \text{ also}$$

$$c_1 = \frac{v_1(m_1 - m_2) + 2 v_2 m_2}{m_1 + m_2};$$

ebenso hat m_2 die schließliche Geschwindigkeit

$$c_2 = v_2 - 2\left(v_2 - \frac{v_1 m_1 + v_2 m_2}{m_1 + m_2}\right) \text{ also}$$

$$c_2 = \frac{v_2(m_2 - m_1) + 2 v_1 m_1}{m_1 + m_2}.$$

Bewegen sich die Körper gegen einander, so ist eine Geschwindigkeit, etwa v_2, als negativ zu nehmen, dann ist:

$$c_1 = \frac{v_1 (m_1 - m_2) - 2 v_2 m_2}{m_1 + m_2} \text{ und } c_2 = \frac{v_2 (m_1 - m_2) + 2 v_1 m_1}{m_1 + m_2}$$

Sind beide Massen einander gleich, so ist im ersten Falle $c_1 = v_2$ und $c_2 = v_1$ d. h. die Massen gehen mit vertauschten Geschwindigkeiten weiter; im zweiten Falle ist $c_1 = - v_2$, $c_2 = v_1$ d. h. die Massen gehen mit vertauschten Geschwindigkeiten und nach entgegengesetzten Richtungen aus einander. Ist hiebei ein Körper zuerst in Ruhe, also im ersten Falle $v_1 = 0$, so ist $c_1 = v_2$, $c_2 = 0$, d. h. es kommt der zweite, stoßende Körper in Ruhe, und der erste geht mit dessen Geschwindigkeit fort.

Stößt ein Körper gegen eine feste Wand, so kann man deren Masse als unendlich groß ansehen, also etwa im ersten Falle $m_1 = \infty$, $v_1 = 0$ setzen; um die Werte von c_1 und c_2 zu finden, dividiere man Zähler und Nenner mit m_1, setze dann $m_1 = \infty$, also $\frac{1}{m_1} = 0$, so wird $c_1 = 0$, $c_2 = - v_2$, der Körper m_2 geht also von der Wand mit derselben Geschwindigkeit wieder zurück.

Sind die Massen nicht vollständig elastisch, so geschieht die Ausbiegung der getroffenen Stellen nicht vollständig und nicht mit derselben Kraft wie die Einbiegung, es sind also auch die Geschwindigkeitsänderungen während des Ausbiegens kleiner als die beim Einbiegen.

279. Lebendige Kraft.

Wenn eine Kraft von P *kg* durch eine Strecke von s Meter auf einen frei beweglichen Körper gewirkt hat, so hat sie eine Arbeit geleistet, die man in Kilogrammetern messen kann durch das Produkt $P \cdot s$. Der Erfolg dieser Kraftwirkung besteht darin, daß eine gewisse Masse (M), auf welche die Kraft gewirkt hat, eine gewisse Geschwindigkeit (v) erhalten hat. Wir stellen eine Gleichung auf zwischen dieser Ursache und ihrer Wirkung.

Nun ist $v = \sqrt{2 \varphi s}$ aber $\varphi = \frac{P}{M}$, sonach $v = \sqrt{2 \frac{P}{M} \cdot s}$.

Diese Gleichung bringen wir in die Form

$$\mathbf{Ps = \frac{1}{2} Mv^2.}$$

In dieser Form zeigt die Gleichung, wie die Ursache, daß nämlich die Kraft P längs des Weges s wirkt, zusammenhängt mit der Wirkung, daß nämlich eine Masse M eine Geschwindigkeit v erhalten hat.

Ebenso kann M aus dieser Gleichung berechnet werden, wenn die anderen Größen bekannt sind.

Wenn die Kraft P längs des Weges s gewirkt hat, so ist diese Energie (Ps) nicht mehr vorhanden; sie ist aber nicht aus der Natur verschwunden, sondern als Ersatz derselben ist eine Geschwindigkeit v vorhanden, welche eine Masse M erhalten hat. **Die mit der Geschwindigkeit v behaftete Masse M stellt das Äquivalent für die verschwundene Energie Ps dar.** Diese Masse M behält nun nach dem Trägheitsgesetz ihre Geschwindigkeit unverändert und immerfort bei, in ihr lebt gleichsam (daher der Ausdruck lebendige Kraft), die vorher in ruhender Form vorhanden gewesene Energie Ps.

Stellt sich der Masse M auf ihrer Bahn früher oder später ein Hindernis in den Weg, zu dessen Überwindung sie eine gewisse Kraft P brauch, so kann sie dies Hindernis überwinden auf die Wegstrecke s hin, welche sich berechnet aus $s = \frac{a2}{2\varphi}$, wobei $a = v$, $\varphi = \frac{P}{M}$, also

$$s = \frac{v^2 \cdot M}{2P}, \text{ oder in anderer Form}$$

$$\tfrac{1}{2} Mv^2 = Ps.$$

Dies ist dieselbe Gleichung wie vorher, und sie gibt an, wie nun die Ursache, nämlich daß eine Masse eine Geschwindigkeit hat, zusammenhängt mit der Wirkung, daß nämlich eine Kraft längs eines Weges ausgeübt wird.

Eine mit der Geschwindigkeit v behaftete Masse M besitzt also Arbeitsfähigkeit, und stellt also eine Energie dar, ihre Größe ist ausgedrückt durch $\frac{1}{2} Mv^2$; d. h. **die Energie eines in Bewegung befindlichen Körpers ist proportional der Masse und proportional dem Geschwindigkeitsquadrate.** Diese Energie einer in Bewegung befindlichen Masse nennt man die lebendige Kraft dieser Masse. Daß sie gemessen werde durch das Produkt aus Masse mal Geschwindigkeitsquadrat, wurde zuerst von Leibnitz angegeben 1646. Hat von zwei gleich schweren Körpern der eine eine doppelt so große Geschwindigkeit, so hat er eine 4 mal so große lebendige Kraft. Zwei bewegte Körper haben gleiche Energie, wenn $Mv^2 = M_1 v_1^2$. Die lebendige Kraft des bewegten Körpers (Bewegungsenergie) kann auch durch die mechanische Energie (mechanische Arbeit) gemessen werden, denn $\frac{1}{2} Mv^2 = Ps$, hiebei stellt ja Ps die mechanische Arbeit dar, ausgedrückt durch *kgm*. Ein Körper von 80 *kg* Gewicht und 3 *m* Geschwindigkeit hat also eine Energie von $\frac{Mv^2}{2} = \frac{80}{10} \cdot \frac{3^2}{2} = 36$ *kgm*. Er kann also, bis er zur Ruhe kommt,

eine Arbeit von 36 *kgm* leisten; diese Arbeit kann er auf verschiedene Art leisten, etwa indem er die konstante Kraft von 36 *kg* auf 1 *m* oder von 9 *kg* auf 4 *m* oder von 2 *kg* auf 18 *m* ꝛc. ausübt, denn jede solche Arbeit Ps = 36 *kgm*.

Beispiel: Ein Eisenbahnzug von 3000 Zentner hat eine Geschwindigkeit von 6 *m*, wie weit wird er bei abgesperrtem Dampfe noch frei weiterlaufen, wenn die Reibung (ohne Bremsen) $^1/_{100}$ von der Last ist?

$$M = \frac{3000 \cdot 50}{10} = 15000; \; v = 6; \; p = \frac{3000 \cdot 50}{100} = 1500 \; kg,$$

also $$\frac{Mv^2}{2} = Ps; \quad \frac{15000 \cdot 6^2}{2} = 1500 \cdot s; \; s = 180 \; m.$$

Wenn die Kraft P längs des Weges s auf eine frei bewegliche Masse wirkt und dieser dadurch die entsprechende Geschwindigkeit erteilt, so ist es gleichgültig, welche Zeit dieser Vorgang beansprucht; ist z. B. die Masse M groß (klein), so nimmt sie die Bewegung nur langsam (sehr rasch) an, und es dauert lange (kurze) Zeit, bis sie die Wegstrecke s durchlaufen hat. Die Geschwindigkeit, welche 2 verschiedene Massen dabei erhalten, sind natürlich verschieden, aber die lebendige Kraft, die sie erhalten haben, ist dieselbe $Mv^2 = M'v'^2$, und abhängig von der Zeit. Dasselbe gilt umgekehrt, wenn eine lebendige Kraft $\frac{1}{2} Mv^2$ eine Arbeit P · s leistet.

280. Mechanisches Äquivalent der Wärme.

Es kann mechanische Arbeit (mechanische Energie) in Wärme verwandelt werden; wenn man z. B. mit einem Hammer oft auf ein Stück Eisen schlägt, so wird es warm; es verschwindet dabei Energie, nämlich die lebendige Kraft des Hammers, da er beim Aufschlagen seine Bewegung verliert; als Ersatz für diese verschwundene Bewegungsenergie kommt Wärme zum Vorschein. Es hat sich demnach eigentlich die mechanische Energie (Ps) zuerst in Bewegungsenergie $\frac{1}{2} Mv^2$ (des Hammers) verwandelt, und diese Bewegungsenergie verwandelt sich in Wärme. Ähnliche Beispiele gibt es noch viele: ein Bohrer, eine Säge, besonders wenn sie stumpf sind, erhitzen sich. Jede Reibung erzeugt Wärme, denn die Reibung bewirkt einen Geschwindigkeitsverlust des sich reibenden Körpers, und diese verschwindende Bewegungsenergie verwandelt sich in Wärme: Hat man Wasser in einer engen Messingbüchse und reibt dieselbe sehr stark, so kommt das Wasser sogar ins Kochen. So hat besonders Graf Rumford in der Geschützgießerei in München gefunden, daß ein stumpfer Kanonenbohrer sich stark erhitzt, und daß dazugegossenes Wasser ins Kochen kommt und weiter kocht, so lange gebohrt wird. Er schloß daraus nicht nur, daß Reibung

Wärme erzeugt, sondern auch, daß Wärme nicht ein Stoff sein könne, da er sonst nicht in beliebiger Menge aus einem Stoffe (Bohrer) herausgenommen werden könne, sondern daß Wärme selbst eine Art Bewegung sein müsse, da sie aus Bewegung entsteht. Wenn man Luft zusammenpreßt, wozu ja Energie aufgewendet, Arbeit geleistet werden muß, indem man den Druck auf eine gewisse Wegstrecke hin überwindet, so wird die Luft dadurch wärmer.

In all diesen Fällen wird eine mechanische Energie ($P \cdot s$) oder eine lebendige Kraft ($\frac{1}{2} Mv^2$) aufgewendet, sie verschwindet und an ihrer Stelle, als Ersatz für sie, erscheint Wärme.

Dies veranlaßte R. Mayer, Arzt in Heilbronn, und den Engländer Joule, zu untersuchen, welche Quantitäten mechanischer Energie und Wärme sich entsprechen, also insbesondere zu untersuchen, wie viele *kgm* aufgewendet werden müssen, um 1 Kalorie zu erzeugen. Man fand, 425 *kgm* mechanische Energie bringen 1 Kalorie hervor. Dies fand R. Mayer, dem man überhaupt die wichtigsten Aufklärungen über die Verwandlung von Energien verdankt, auf folgende Art (1842). Man wußte schon längere Zeit, daß Luft verschiedene Wärmekapazität hat, je nachdem man sie in offenem oder verschlossenem Gefäße erwärmt. Z. B. um Luft in verschlossenem Gefäße von 0^0 auf 100^0 zu erwärmen, wobei sie sich ja nicht ausdehnt, sind für jedes *kg* Luft 16,86 Kal. erforderlich; um sie aber in offenem Gefäße zu erwärmen, wobei sie sich ausdehnt, sind für 1 *kg* 23,77 Kal. erforderlich; R. Mayer sagte nun: Hiebei sind die 16,86 Kal. erforderlich, um die Luft zu erwärmen, der Überschuß von 6,91 Kal. kommt aber nicht als Wärme zum Vorschein, sondern ist dazu verwendet worden, um Arbeit zu leisten; denn wenn die Luft sich ausdehnt, so muß der auf ihr liegende Luftdruck überwunden (die Luftsäule gehoben) werden. Die Größe dieser Arbeit ist aber leicht zu berechnen. 1 *kg* Luft hat nämlich bei 0^0 ein Volumen $= \frac{1}{0,00129} = 775\ l$; also wenn es sich in einem Raume befindet, der 1 *qm* Grundfläche hat, so hat es eine Höhe von 7,75 *dm*. Erwärmt man diese Luft, so dehnt sie sich aus und zwar der Höhe nach um $7,75 \cdot 0,366 = 2,84\ dm = 0,284\ m$. Dabei muß sie den Luftdruck von $10000 \cdot 1,033 = 10330\ kg$ überwinden, leistet also eine Arbeit von $10330 \cdot 0,284\ kgm = 2934\ kgm$. Zu dieser Arbeit sind 6,91 Kal. verwendet worden, also treffen auf 1 Kal. 424 *kgm*.

Joule machte eine Reihe verschiedener Versuche, bei denen er durch Reibung oder Stoß Wärme erzeugte, und fand (später) dieselbe Zahl.

Diese Zahl, „425 *kgm* (wie man jetzt annimmt), nennt man das **mechanische Äquivalent der Wärme; sie gibt an, wie viele Einheiten der mechanischen Energie gleichwertig oder äquivalent sind einer Wärmeeinheit, einer Einheit der kalorischen Energie.** Ebenso ist $^1/_{425}$ Kalorie das Wärmeäquivalent von 1 *kgm*.

Besonders gut läßt sich die Verwandlung von Arbeit in Wärme und deren Umkehrung bei Gasen verfolgen. Wenn man Luft komprimiert, so muß man, um die Expansivkraft der Luft zu überwinden, eine gewisse Menge Arbeit aufwenden, indem man etwa den Kolben der Kompressionspumpe niederdrückt. Die Folge ist nicht bloß eine Drucksteigerung, sondern auch eine sehr beträchtliche Erwärmung. Die Berechnung derselben kann nicht auf elementarem Weg erfolgen, doch ersieht man aus folgender Tabelle, wenn man 1 cbm Luft von 0° und 1 Atm. Druck (760 mm) bis auf 2,3 . . . . Atmosphären zusammendrückt, welche Arbeit hiezu erforderlich ist, welche Temperatur die Luft dann hat (vorausgesetzt, daß sie keine Wärme an die Gefäßwände abgibt), und welches Volumen sie dann hat.

Kompression von 1 cbm Luft von 0° und 1 Atm.

Atmosph.	Kompressionsarbeit in kgm	Temperatur in C°.	Volumen in cbm
2	5639	60,4	0,611
3	9505	101,8	0,457
4	12517	134,2	0,373
5	15059	161,3	0,318
6	17248	184,7	0,280
7	19186	205,3	0,251
8	20938	224,3	0,228
9	22552	241,5	0,210
10	24034	357,4	0,194

Läßt man die Luft sich sofort wieder ausdehnen, bevor sie Gelegenheit hatte, etwas von ihrer Wärme abzugeben, so kehrt sie vollständig in ihren Anfangszustand zurück; sie leistet aber dabei eine Arbeit, denn sie übt einen ihrer jeweiligen Expansivkraft entsprechenden Druck längs des Ausdehnungsweges aus; dies geschieht aber auf Kosten der Wärme, denn sie kühlt sich dabei von selbst wieder auf 0° ab; es hat sich die Wärme (ein Teil ihres Wärmegehaltes) in mechanische Arbeit verwandelt, und zwar leistet sie genau ebensoviel Arbeit als vorher zu ihrer Kompression aufgewendet wurde.

Läßt man jedoch die vorher komprimierte Luft sich zuerst abkühlen bis 0°, indem man ihr etwa durch eine abgekühlte Gefäßwand Wärme entzieht, wobei man dafür sorgt, daß sie ihre Spannkraft

beibehält, und läßt sie nun sich vermöge ihrer Spannkraft ausdehnen, so kann sie vermöge der Spannkraft eine Arbeit leisten; aber dies geschieht wieder auf Kosten der Wärme, und es zeigt sich, daß sie sich wieder beträchtlich abkühlt. Aus folgender Tabelle ist die hiebei wiedergewinnbare Arbeit und die Temperaturerniedrigung zu ersehen, wenn man die komprimierte Luft zuerst auf 0^0 abkühlt und dann erst sich bis zu einer Atm. Spannkraft ausdehnen läßt.

Atmosph.	Expansionsarb. in kgm.	Temperaturerniedrigung.
2	3347	— $36,2^0$
3	5146	— 55,1
4	6312	— 67,6
5	7172	— 78,8
6	7845	— 84,0
7	8394	— 89,9
8	8856	— 94,8
9	9253	— 99,1
10	9602	—102,8

Das Mariotte'sche Gesetz, demzufolge ein Gas ein n mal kleineres Volumen bekommt, wenn der Druck n mal größer wird, gilt nur, wenn die Temperatur während der Kompression dieselbe bleibt, wenn also die durch Kompressionsarbeit entstandene Wärme während der Kompression dem Gas derart entzogen wird, daß die Endtemperatur gleich ist der Anfangstemperatur; bei Expansion muß entsprechend Wärme zugeführt werden.

Wenn Dampf von etwa 8 Atmosphären (gesättigt) in einem Dampfmaschinencylinder eingeschlossen ist etwa ($^1/_4$ voll), so drückt er den Kolben vorwärts und leistet Arbeit (Expansionsmaschine); dadurch kühlt er sich aber ab, und ein Teil desselben wird sogar zu Wasser; also Eigenwärme und latente Wärme des Dampfes verschwinden und dafür wird mechanische Arbeit geleistet. Wir sahen, daß 1 *kg* Steinkohle beim Verbrennen ca. 7500 Kalorien liefert; könnte man diese ganze Wärmemenge in Arbeit verwandeln, so würde das $7500 \cdot 425$ *kgm* = 3 187 500 *kgm* liefern; würde diese Arbeit etwa während einer Stunde verrichtet, so würden auf jede Sekunde $\frac{3\,187\,500}{3600}$ *kgm* = 885 *kgm* treffen, oder, da 75 *kgm* = 1 Pferdekraft, würden ca. 12 Pferdekräfte geleistet werden. Also die durch Verbrennen von 1 *kg* Steinkohle erzeugte Wärme würde, wenn man sie ganz in Arbeit verwandeln könnte, hinreichen, um 1 Stunde lang zwölf Pferdekräfte zu liefern; thatsächlich liefern unsere Dampfmaschinen kaum $10^0/_0$, die besten nur $12^0/_0$, Lokomotiven bloß $5^0/_0$ davon. Von diesem Gesichtspunkte aus be-

trachtet, sind also die Dampfmaschinen sehr unvollkommene Maschinen, sie arbeiten nicht sparsam, sie verwandeln bei weitem nicht alle Wärme in Arbeit, die meiste Wärme geht durch den Schornstein und durch den Abdampf unbenützt verloren.

281. Elektrische Energie.

Wenn man eine Dynamomaschine umtreibt, so wendet man außer der Reibung noch eine gewisse Arbeit Ps auf; diese wird verwandelt in elektrische Energie, indem eine entsprechende Quantität Elektrizität von gewissem Potenzialunterschied hervorgebracht wird. Wenn sich dann der Potenzialunterschied durch das Fließen im Stromkreise wieder ausgleicht, verschwindet die elektrische Energie; aber dafür kommen dann andere Energien zum Vorschein. **Man mißt die elektrische Energie durch das Produkt aus Stromstärke mal Potenzialdifferenz;** wird in jeder Sekunde 1 *kgm* aufgewendet, so kann man einen Strom erhalten von ca. 10 Amp. Volt., also etwa einen Strom von 5 Amp. Quantität (Stärke) bei einer Potenzialdifferenz an den Erregungsstellen von 2 Volt. oder von 2 Amp. bei 5 Volt. oder entsprechend. Eine durch eine Pferdekraft getriebene Dynamomaschine sollte also einen konstanten Strom von 735 Amp. Volt. geben, in Wirklichkeit ist die Leistung nicht ganz so groß, es geht auch etwas verloren; aber bei guten, insbesondere großen Dynamomaschinen geht nur wenig (5—10 $^0/_0$) verloren, so daß die Dynamomaschinen als vorzügliche, keiner wesentlichen Verbesserung mehr fähige Maschinen anzusehen sind, denn sie verwandeln fast die ganze aufgewendete Arbeit in elektrische Energie. Auch die elektrische Energie liefert dadurch, daß sie im Stromkreis wieder verschwindet, wieder andere Energie: entweder kalorische Energie durch Erwärmung des durchlaufenen Leiters, und zwar 1 Kal. pro 425 *kgm* oder pro 4227 Amp. Volt.; oder es wird selbst wieder mechanische Energie erzeugt; denn wenn der Strom durch eine zweite Dynamomaschine geleitet wird, so wird diese umgedreht, und liefert Arbeit unter Verbrauch der elektrischen Energie; denn von der elektrischen Energie wird wirklich ein Teil verbraucht, indem ein Teil der Potenzialdifferenz in der zweiten Dynamomaschine verbraucht wird, ohne Wärme zu bilden. Es kann also die elektrische Energie wieder direkt in mechanische Energie verwandelt werden, und zwar liefern auch wieder ca. 10 Amp. Volt. 1 *kgm* per Sekunde oder 735 Amp. Volt. eine Pferdekraft. Auch hiebei geht ein Teil verloren, d. h. wird nicht in mechanische Energie sondern in andere Energien, etwa kalorische, verwandelt; doch liefern gute Maschinen bis 90 $^0/_0$ Nutzeffekt, die besten bis 97 $^0/_0$. Natürlich wenn, wie bei der elektrischen Kraftübertragung, der Abstand beider Maschinen groß, also auch der Leitungswiderstand zwischen ihnen groß ist, so

verlegt sich ein großer Teil des Gefälles in die Leitung selbst, ein großer Teil der elektrischen Energie wird in der Leitung in kalorische Energie verwandelt und geht für uns verloren, so daß der wirklich übertragene Betrag mechanischer Arbeit verhältnismäßig klein ist, 50%, oder bloß 25% ca.

282. Allgemeine Lehre von der Energie.

Wir haben bisher von einigen Energien gesprochen, und müssen den Begriff der Energie nun genauer betrachten. **Energie ist Zustand der Materie, dem zufolge eine Kraft Gelegenheit und Fähigkeit hat, längs eines gewissen Weges zu wirken, also eine Arbeit zu leisten.** Jede solche Energie heißt eine **Energie der Lage** oder eine **potenzielle Energie.**

Hieher gehört die Energie der Schwerkraft oder **Gravitationsenergie**: sie ist vorhanden, wenn eine schwere Masse (ein Stein) einen bestimmten Abstand von einem ihn anziehenden Körper (Erde) hat; ferner die **Energie der Elastizität;** sie ist vorhanden, wenn ein elastischer Körper eine Formveränderung erlitten hat (eine Feder zusammengedrückt ist) und nun in die ursprüngliche Gestalt zurückkehren will; auch hier kann eine Kraft längs eines gewissen Weges wirken; ferner die **Energie eines Gases** (oder Dampfes) die Energie des Magnets, die Energie der statischen Elektrizität und die Energie der elektrodynamischen Anziehung eines Stromteiles (Ampères Gesetze der Anziehung zweier Stromteile).

In all diesen Fällen ist eine Kraft vorhanden, welche das Bestreben und die Möglichkeit hat, längs eines gewissen Weges zu wirken. **Die potenzielle Energie wird gemessen durch das Produkt aus Kraft und Weg** $= P \cdot s$. Ein Stein von 5 *kg* Gewicht, welcher von der Erde 6 *m* entfernt ist, hat oder repräsentiert eine Energie von $5 \cdot 6$ *kgm*. Diese Berechnung des Wertes der Energie ist bei der Schwerkraft deshalb so einfach, weil die Größe der Schwerkraft sich nicht (wesentlich) ändert, wenn man sich nicht weit von der Erdoberfläche entfernt. In allen anderen angegebenen Fällen ändert sich die Kraft aber wesentlich, wenn der Weg wirklich zurückgelegt wird, z. B. die elastische Kraft der Feder nimmt ab, wenn die Feder in die ursprüngliche Gestalt zurückkehrt; auch die Spannkraft des Gases oder Dampfes nimmt bei der Ausdehnung ab; ferner nimmt die Anziehung des Magnets, der Elektrizität, der Stromteile zu, wenn sich die Massen nähern und zwar so, wie das Quadrat der Entfernung abnimmt. Will man in einem solchen Fall die Größe der Energie berechnen, so muß man den ganzen Weg in sehr viele kleine Strecken zerlegen und berechnen, wie groß die Kraft am Anfang jeder Strecke ist; dann kann man, ohne einen großen Fehler zu begehen, annehmen, daß die Kraft längs der kleinen Strecke kon-

stant bleibt; man hat also jede Kraft mit der zugehörigen Strecke zu multiplizieren und sämtliche Produkte zu addieren. In jedem Falle ergibt sich die Größe der Energie ausgedrückt durch *kgm*.

Eine andere Art von Energie ist die Energie welche ein in Bewegung befindlicher Körper besitzt, **die Bewegungsenergie, kinetische Energie oder lebendige Kraft**; denn auch ein solcher Körper befindet sich in einem Zustand, demzufolge er die Fähigkeit besitzt, eine Kraft längs eines Weges auszuüben. Wir haben gesehen, daß eine Masse M, welche die Geschwindigkeit v besitzt, eine Kraft P längs des Weges s ausüben kann, so daß $\frac{1}{2}Mv^2 = Ps$. Es kann also auch die Energie einer bewegten Masse ausgedrückt werden durch *kgm*, und sie wird gemessen durch das Produkt $\frac{1}{2}Mv^2$.

Eine andere Art von Energie ist die **Energie der Wärme**, denn auch die Wärme ist ein Zustand, vermöge dessen ein Körper eine Kraft längs eines Weges ausüben kann. Wir haben gesehen, daß eine Kal. = 425 *kgm*. Es kann also auch die Wärmeenergie durch *kgm* ausgedrückt werden. Nach der mechanischen Gastheorie nimmt man an, daß ein Gas seine Spannkraft nur dadurch hat, daß die Gasmoleküle eine gewisse Geschwindigkeit haben; da nun bei gleichem Volumen die Spannkraft von der Wärme abhängig ist, so schließt man, daß mit zunehmender Temperatur die Geschwindigkeit der Glasmoleküle wächst. Demgemäß kann man die Wärme als kinetische Energie, als lebendige Kraft der Moleküle ansehen. Nimmt man ebenso an, daß auch in festen und flüssigen Körpern die Moleküle nicht ruhig neben einanderliegen, sondern schwingende oder drehende Bewegungen um ihre Gleichgewichtslage machen, nimmt man dazu noch an, daß die Größe dieser Bewegungen mit steigender Temperatur wachse, so kann man auch die Wärme eines festen oder flüssigen Körpers als kinetische Energie, als lebendige Kraft der schwingenden Moleküle auffassen.

Wenn man sieht, daß beim Schmelzen und Sieden Wärme verbraucht wird (latente Wärme), so kann man sich das etwa so vorstellen, daß hiebei die dem Körper zugeführte Energie nicht dazu verwendet wird, um die schon vorhandene Bewegung der Moleküle zu vergrößern, sondern um ihnen eine ganz neue Art von Bewegung zu erteilen, z. B. um ihnen eine fortschreitende Bewegung zu erteilen beim Verdampfen. So kann auch die latente Wärme als kinetische Energie aufgefaßt werden.

Eine andere Art von Energie ist die elektrische Energie; eine elektrische Menge, welche eine gewisse Spannkraft hat, hat eine gewisse Energie, denn sie kann dadurch, daß sie ihre Spannkraft vermindert (etwa zur Erde abfließt), eine gewisse Arbeit leisten. Im galvanischen Strome findet ein beständiges Fließen der Elektrizität und damit ein beständiges Herabsinken von Elektrizität von höherer Spannung auf niedrigere Spannung statt. Die freien

Mengen ± Elektrizität, welche an den Polen (Erregungsstellen) auftreten, stellen infolge ihres Spannungsunterschiedes eine Energie vor, ebenso wie die Mengen Wassers, die am oberen Teile des Wasserfalles ankommen, infolge ihres Abstandes von der Erde eine Energie vorstellen. Die Energie dieser Mengen ± Elektrizität wird gemessen durch das Produkt aus ihrer Menge mal ihrer Spannungsdifferenz, ebenso wie die Energie des Wassers durch das Produkt aus Masse (*kg*) mal Abstand (*m*) gemessen wird. Ebenso, wie nun in einem Wasserfalle in jeder Sekunde eine gewisse Menge Energie verschwindet, die durch das Produkt $P \cdot s$ gemessen wird, so verschwindet auch im galvanischen Strome pro 1″ eine gewisse Menge Energie, die durch das Produkt aus Menge (Stromstärke, Amp.) mal Spannungsdifferenz (Volt) gemessen wird. Im galvanischen Strome findet also ein beständiges Verwandeln einer elektrischen Energie in eine andere (mechanische, kalorische ꝛc.) Energie statt.

Man kann auch noch von einer chemischen Energie sprechen, insofern als zwei chemisch mit einander verwandte Körper, z. B. Kohle und Sauerstoff, wenn sie sich verbinden, Wärme entwickeln, also eine andere Energie hervorbringen. Man mißt die chemische Energie durch den Betrag, der bei der chemischen Verbindung zum Vorschein kommenden Wärmemenge, also durch Kalorien und kann sie, da 1 Kal. = 425 *kgm* ist, auch durch *kgm* messen. Da etwa 1 *kg* Wasserstoff, wenn es sich mit der entsprechenden Menge (8 *kg*) Sauerstoff verbindet, 34197 Kal. erzeugt, diese aber 34179·425 *kgm* = 14526000 *kgm* äquivalent sind, so repräsentiert das System $H_2 \mid O$ eine chemische Energie von 14526000 *kgm* für 1 *kg* Wasserstoff. Will man umgekehrt 9 *kg* Wasser wieder in H_2 und O zerlegen, also die chemische Energie herstellen, so ist hiezu ein Aufwand von 14526000 *kgm* Energie notwendig. Allgemein: **Jede chemische Änderung ist mit Energieänderung verbunden, meistens thermischer, oft auch elektrischer Art.**

Eine andere Art von Energie ist die Energie der strahlenden Wärme, etwa der Sonnenwärme. In den Licht- und Wärmestrahlen überträgt sich nämlich Wärmeenergie der Sonne zu uns. Die Sonne strahlt Wärme aus (jeder *qm* Sonnenoberfläche ca. 20000 Kal. pro 1 Sek.) und verliert dadurch Wärme; treffen die Sonnenstrahlen auf die Erdoberfläche, so wird die Wärme wieder frei, ca. 4 kl. Kal. pro 1 *qcm* in 1 Min. Deshalb sind auch die Wärmestrahlen als Energie zu betrachten und können gemessen werden durch den Betrag der Kalorien, den sie hervorbringen, also dann auch durch *kgm*.

Die Sonnenstrahlen bringen auch chemische Energie hervor.

283. Umwandlung der Energie.

Wir haben nun schon vielfach erkannt, daß sich solche Energien in einander umwandeln lassen; die ganze Physik ist eigentlich die Lehre von der Umwandlung der Energien. So haben wir in der Mechanik gesehen, wie sich Energie der Lage, z. B. Gravitationsenergie verwandelt in Bewegungsenergie; denn wenn ein Körper zur Erde fällt, so hatte er zuerst einen gewissen Betrag von Gravitationsenergie, $P \cdot s$; diesen verliert er dadurch, daß er zur Erde fällt und erhält dafür eine Geschwindigkeit, stellt also eine Bewegungsenergie vor, $\frac{1}{2}Mv^2$. Umgekehrt, wenn der Körper aufwärts geworfen wird, so verwandelt sich seine Bewegungsenergie $\frac{1}{2}Mv^2$ wieder in Gravitationsenergie, $P \cdot s$. Ebenso sahen wir, daß Wärme eine Spannungsenergie, die Energie des Dampfes, hervorbringt, daß diese wieder Bewegungsenergie hervorbringt, daß umgekehrt auch wieder Bewegungsenergie sich in Wärme verwandelt (Reibung). Besonders bei der elektrischen Energie erkannten wir, daß sie durch die verschiedenartigsten Ursachen hervorgebracht werden kann, daß also die verschiedensten Energien sich in elektrische Energie verwandeln können. Elektrische Energie entsteht durch mechanische Energie (Reibung, Aufheben des Elektrophordeckels), chemische Energie (galvanisches Element), Wärme (Thermoelement), magnetische oder elektrische Energie (Induktion), Bewegungsenergie (dynamoelektrische Maschine). Umgekehrt kann sich aber auch elektrische Energie wieder in die verschiedensten Energien verwandeln: wenn im galvanischen Strome elektrische Energie verschwindet, so entsteht Wärme in jedem Leiter), chemische Energie (bei der Elektrolyse), mechanische Energie oder Energie der Lage (Elektromagnet, elektrodynamische Anziehung), Bewegungsenergie (elektrodynamische Maschine). Durch chemische Energie entsteht Wärme; aber auch strahlende Wärme kann sich in chemische Energie verwandeln; denn in den lebenden Pflanzen, wenn sie vom Sonnenlicht (oder elektrischen Licht) getroffen werden, wird die von den Pflanzen eingeatmete Kohlensäure zerlegt in Kohle und Sauerstoff und zwar wird diese Zerlegung nur dadurch hervorgebracht, daß ein Teil der Energie der Sonnenstrahlen verschwindet, also nicht als freie Wärme zum Vorschein kommt.

Wir sehen also, daß sich viele Energien in einander verwandeln lassen, daß sich jede Energie mindestens in eine andere verwandeln läßt.

Wir sprechen auch von aufgespeicherter Energie. Eine Energiemenge, welche man einem Massensystem gegeben hat und welche demselben durch Verwandlungen und Übertragungen wieder entzogen werden kann, nennen wir eine aufgespeicherte. Die Uhr wird in Gang erhalten durch die aufgespeicherte Energie des gehobenen Gewichtes oder der gespannten, aufgezogenen Feder. Bei

den elektrischen Akkumulatoren wird elektrische Energie in chemische verwandelt, unverändert aufbewahrt, so lange man wünscht, und dann wieder in elektrische verwandelt.

284. Erhaltung der Energie.

Bei Betrachtung der Verwandlung von Energien in einander ist man zu dem ganz allgemeinen Satze gekommen, daß, **wenn ein gewisser Betrag einer Energie verschwindet, stets die Beiträge der Energien, welche dadurch zum Vorschein kommen, in Summe dem verschwundenen Betrag gleich sind.** (R. Mayer). Eine in der Natur vorhandene Energie kann also nicht zu nichts werden, sondern kann sich nur in eine oder mehrere andere Energien verwandeln derart, daß beide Beträge einander gleich sind. Man sagt also: die Energie verschwindet nicht, sondern verwandelt sich nur in andere Energien, wobei die Größe der vorhandenen Energie ungeändert bleibt, und nennt deshalb diesen Satz den **Satz von der Erhaltung der Energie.**

Dieser Satz spricht zugleich aus, daß eine Energie nicht aus nichts entstehen kann, daß durch Aufwand einer Energie nicht eine dem Betrag nach größere Energie hervorgebracht werden kann, daß also die Gesamtsumme der in der Natur vorhandenen Energien weder vergrößert noch verkleinert werden kann. Es ist dieser Satz der allgemeinste, oberste und alle Vorgänge der Natur beherrschende Satz, der sich würdig und ebenbürtig dem durch die Wissenschaft der Chemie gefundenen Satze anschließt, daß der Stoff sich erhält, daß die Menge des in der Natur vorhandenen Stoffes weder verringert noch vermehrt werden kann.

Wir betrachten diesen Grundsatz von der Erhaltung der Energie an einigen Beispielen. Bei den einfachen Maschinen (Hebel, Rolle, Wellrad, schiefe Ebene, Schraube), sowie bei allen zusammengesetzten Maschinen (Krahnen, Räderwerk 2c.) fanden wir die goldene Regel, daß die Kräfte sich verhalten, wie umgekehrt die Wege, oder daß die Arbeit der Kraft gleich ist der Arbeit der Last. Dieser Satz, dessen Richtigkeit und Wichtigkeit man schon früher erkannte, nannte man den Satz von der Erhaltung der Kraft oder der Erhaltung der Arbeit. Wir können nun so sagen: Bei all diesen Maschinen verschwindet eine Energie, da eine Kraft längs eines Weges wirkt, dafür kommt eine andere Energie zum Vorschein, z. B. eine Gravitationsenergie, da ja ein schwerer Körper so und so hoch gehoben wird. Die Beträge beider Energien, ausgedrückt in *kgm* sind einander gleich, oder allgemein: **Bei allen mechanischen von Stoß und Reibung freien Vorgängen ist immer die Summe der vorhandenen lebendigen und Spann-Kräfte konstant** (Helmholtz).

In Wirklichkeit zeigt sich jedoch stets ein Verlust an gewonnener Energie: ein Teil der aufgewendeten Energie scheint verloren gegangen zu sein. Dieser Teil ist aber nicht verloren gegangen, sondern hat sich durch die Reibung in eine andere Energie etwa Wärme, verwandelt. Wenn man imstande wäre, all die scheinbar verlorene Energie zu messen, also zu messen, wie viel Wärme entstanden ist, wie viel Energie in Luftbewegung verwandelt worden ist, wie viel Energie vielleicht als Elektrizität zum Vorschein gekommen ist u. s. f., wenn man also all diese nebenher entstandenen Energien messen könnte, so würde ihr Betrag gerade so groß sein, als der Verlust, der sich an der erhaltenen Energie gezeigt hat. Man sagt von solcher verloren gegangener Energie wohl auch, sie hat sich zerstreut.

Wenn im galvanischen Elemente Zink verbraucht wird, so wird dadurch eine gewisse Menge chemischer Energie verbraucht, indem sich Zn mit O verbindet. Dafür entstehen nun andere Energien; erstens es braust Wasserstoff auf, der selbst noch eine gewisse chemische Energie (Verwandtschaft zu O) hat; zweitens wird Wärme im Elemente frei; drittens entsteht elektrische Energie, die aber im galvanischen Strome sofort wieder verschwindet und dadurch Wärme (im Draht), Energie der Lage oder Bewegung (Umtreiben einer elektrischen Maschine, Treiben einer elektrischen Klingel) vielleicht auch noch chemische Energie (Ausscheiden von Cu aus SO_4 Cu bei unlöslicher Anode) hervorbringt. Wenn man all diese Energien der Größe nach mißt und addiert, so ist ihr Gesamtbetrag genau gleich der aufgewendeten chemischen Energie, nämlich der chemischen Verwandtschaft des Zn zu O; würde sich direkt Zn mit O verbinden, also Zink verbrennen, so würde der Betrag dieser Verbrennungswärme genau gleich sein der oben genannten Summe der verschiedenen Energien.

Wenn wir verbrennliche Speisestoffe (Mehl, Zucker, Fett ꝛc.) in uns aufnehmen, und dieselben durch die Verdauung ins Blut kommen so verbinden sie sich dort mit dem durch die Lungen aufgenommenen Sauerstoff, d. h. sie verbrennen, ihre chemische Energie verschwindet. Dafür entsteht Wärme, wovon ein Erwachsener täglich ca. 2700 Kal. nach außen abgibt; ferner entsteht die Kraft unserer Muskeln, mittels deren wir andere Energien hervorbringen, z. B. Bewegungsenergien; ein arbeitender Mensch leistet täglich ca. 50 000 *kgm* bloß durch die willkürlichen Muskeln; noch größere Arbeit leisten gewöhnlich die unwillkürlichen. Die Summe der Beträge beider Energien ist gleich dem Betrage der aufgewendeten chemischen Energie, also gleich dem Betrag der durch die wirkliche Verbrennung der Speisestoffe entwickelten Wärme. Die Speisestoffe, z. B. Fett, entwickeln gleichviel Wärmemenge (gleich viel Kalorien) ob sie direkt in der Luft verbrennen, oder ob sie sich im Körper

mit Sauerstoff verbinden, wenn nur in beiden Fällen die Verbrennung eine gleich vollständige ist.

In all diesen Fällen findet also stets der Vorgang statt, daß eine Energie verschwindet und dafür eine oder mehrere Energien zum Vorschein kommen, daß sich also eine ·Energie in eine oder mehrere andere Energien umwandelt, und bei jedem solchen Vorgang gilt der Satz von der Erhaltung der Energien als der allgemeinste und oberste Grundsatz der Physik.

Diesem Grundsatz gemäß ist die Energie des Weltalls ein der Größe nach unveränderliches Ganzes.

Zwölfter Abschnitt: Anhang.

Interferenz, Beugung und Polarisation der Wellen.

285. Interferenz der Wellen.

Wir haben früher schon gehört, daß man das Licht ansieht als eine wellenförmige Bewegung des Äthers, jenes feinen Stoffes der das ganze Welltall erfüllt, auch die festen und flüssigen Körper durchdringt, der Schwerkraft nicht unterworfen ist und als vollkommen elastisch anzunehmen ist. Die gewöhnlichen Erscheinungen der Reflexion und Refraktion haben zu ihrer Erklärung diese Wellentheorie (Undulationstheorie) nicht gerade notwendig; doch gibt es eine Reihe von interessanten Erscheinungen, die sich nur aus dieser Theorie erklären lassen, die zur Aufstellung dieser Theorie geführt und sie begründet haben.

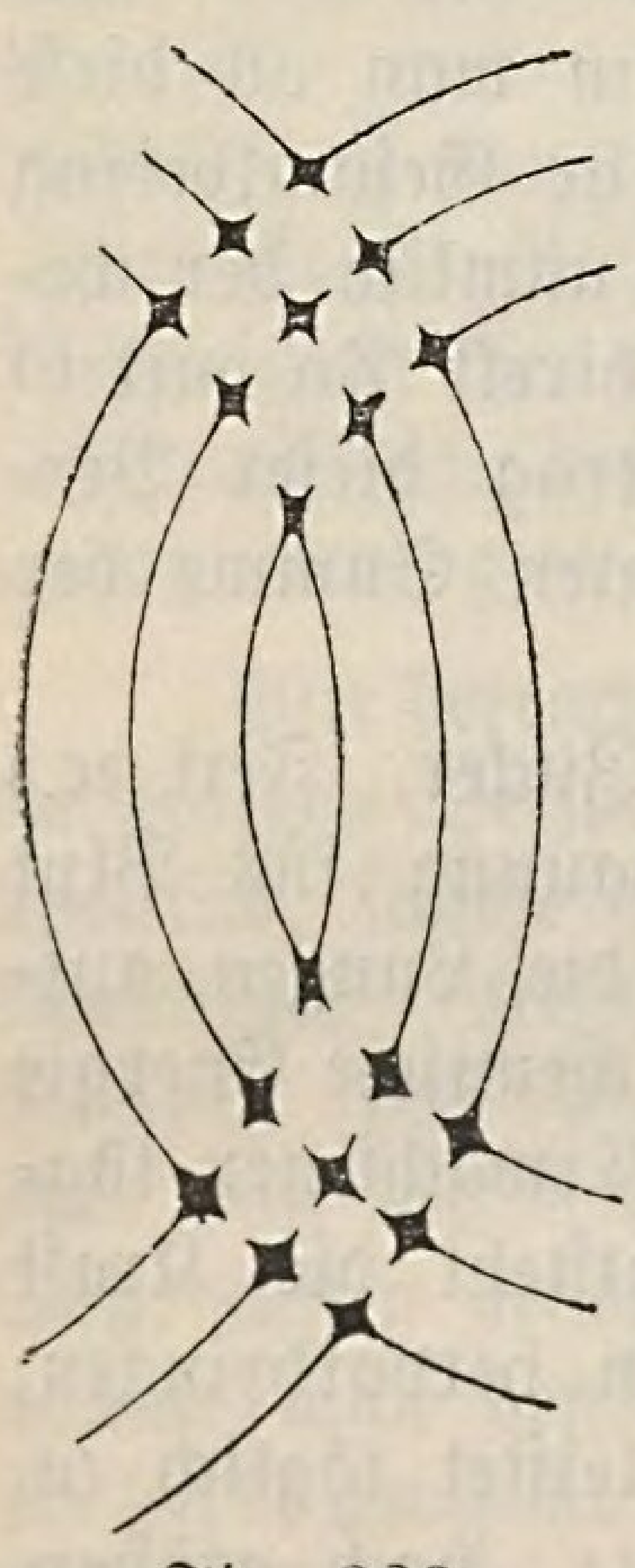


Fig. 338.

Wenn im Wasser zwei Wellen zugleich erregt werden und sich dann begegnen, so durchdringen sie sich und laufen dann so weiter, als wenn sie gar keine Störung gefunden hätten. Dort, wo sie sich durchdringen, ist ihre Gestalt merklich gestört, denn an den Stellen, wo zwei Wellenberge sich treffen, ist ein erhöhter Wellenberg, an den Stellen, wo zwei Thäler sich treffen, ein vertieftes Thal, und dort, wo Berg und Thal sich treffen, heben sich beide auf, so daß das Wasser dort im natürlichen Niveau liegt. Es bedeuten in Figur 338 die Kreislinien die Kämme der Wellenberge zweier sich kreuzenden Wellensysteme, die punktförmig verdickten Stellen bedeuten die kuppenförmig erhöhten Wellenberge; zwischen je 4 von

ihnen liegen die kesselähnlich vertieften Thäler; zwischen 2 benachbarten Bergen liegt eine sattelähnliche Vertiefung und zwischen 2 benachbarten Thälern liegt eine sattelähnliche Erhöhung, deren jede bis zum natürlichen Niveau des Wassers reicht. Die Bewegung der Berge und Täler geschieht nun in der Art, daß es stets so aussieht, als wären die beiden Wellensysteme fortgeschritten, ohne sich zu stören. Jede solche durch Kreuzung von Wellen entstehende Verstärkung oder Aufhebung der Wellenbewegung nennt man Interferenz; manche hierauf beruhenden Erscheinungen bei Schallwellen haben wir schon kennen gelernt, und wenn es erlaubt sein soll, auch das Licht als Wellenbewegung aufzufassen, so muß auch eine Interferenz der Lichtwellen nachweisbar sein.

286. Interferenz des Lichtes.

Die Interferenz des Lichtes wurde von Fresnel durch dessen berühmten Spiegelversuch nachgewiesen.

Läßt man Licht sehr schräg auf zwei Glasspiegel, die unter einem sehr stumpfen Winkel (fast 180°) geneigt sind, auffallen, so werden die Lichtstrahlen so reflektiert, als wenn sie von zwei hinter den Spiegeln liegenden Punkten L′ und L″ herkämen. Wenn also

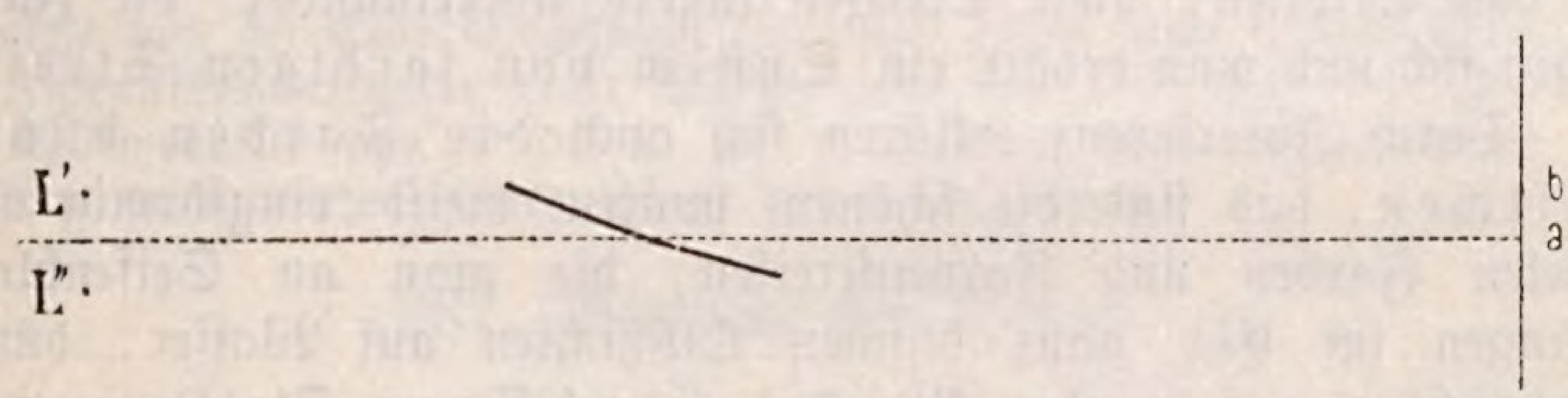


Fig. 339.

von L eine Lichtwelle ausgeht, so ist es gerade so, als wenn von L′ und L″ gleichzeitig zwei gleiche Lichtwellen ausgingen. Bringt man in den Gang dieser Lichtwellen einen Schirm, so erblickt man auf demselben eine Reihe abwechselnd heller und dunkler Streifen, Interferenzstreifen, und erklärt diese durch Interferenz auf folgende Weise. Im Punkte a, der von L′ und L″ gleich weit entfernt ist, treffen auch die Wellen stets gleichzeitig ein, verstärken sich also, in ihm ist es hell, doppelt so hell, als wenn bloß ein Spiegel da wäre. Der Punkt b aber ist von L′ und L″ verschieden weit entfernt: beträgt dieser Unterschied (Gangunterschied) gerade eine halbe Wellenlänge, so treffen in b stets Wellenberg und Wellenthal zusammen; ist von L′ aus ein Wellenberg angelangt, so ist von L″ wegen des größeren Weges ein Wellenthal angelangt und umgekehrt; beide heben sich stets und vollständig auf, in b ist keine Wellenbewegung, also kein Licht, b ist ganz dunkel. c (oberhalb b) ist von L′ und L″ verschieden weit entfernt; beträgt der Unterschied gerade eine ganze Wellenlänge, so treffen dort stets wie-

der die Wellenberge zusammen und dann die Wellenthäler, sie verstärken sich, c hat helles Licht, doppelt so hell, als wenn nur ein Spiegel da wäre, so geht es fort, in d ist es dunkel, in e hell ꝛc.

Da sich die Interferenz des Lichtes durch die Emissionstheorie nicht, durch die Undulationstheorie aber ganz befriedigend erklären läßt, so haben diese Interferenzerscheinungen wesentlich dazu beigetragen, der Undulationstheorie Geltung zu verschaffen; man sieht sie als einen zwingenden Beweis für die Richtigkeit der Undulationstheorie an.

So hat man die Erscheinung der Interferenz, wenn man einfarbiges homogenes Licht, also etwa wenn man das Sonnenlicht durch ein rotes oder ein violettes Glas gehen läßt, oder wenn man das gelbe Licht einer Natriumflamme benützt. Man findet, daß bei rotem Lichte die Interferenzstellen weiter von einander entfernt liegen, als bei violettem, daß b weiter von a entfernt ist, schließt also, daß der Wegunterschied ein größerer ist, daß also auch die Wellenlänge des roten Lichtes größer ist als die des violetten.

Nimmt man weißes Licht bei diesem Versuche, so erzeugt jede Farbe entsprechend der Wellenlänge ihrer Strahlen ein anderes System von Streifen; diese Streifen lagern übereinander, die Farben mischen sich und man erhält ein System von farbigen Streifen.

Durch Interferenz erklären sich auch die Farben dünner Blättchen, das sind die schönen, bunten, meist ringförmig angeordneten Farben und Farbenstreifen, die man an Seifenblasen, Sprüngen im Eis, ganz dünnen Ölschichten auf Wasser, dünnen Oxydschichten auf blanken Metallen (angelassenem Stahl) ꝛc. wahrnimmt. Das auf die dünne Schichte der Seifenblase auffallende Licht wird nämlich teilweise von der äußeren Fläche reflektiert, der andere Teil durchdringt das Seifenwasserhäutchen und wird von der inneren Fläche teilweise reflektiert; beide reflektierten Teile gelangen ins Auge, aber da sie hiezu verschieden lange Wege machen, haben sie einen Gangunterschied, die Lichtwellen interferieren sich deshalb, erzeugen Interferenzstreifen und dadurch die verschiedenen Farben. Diese Erscheinung wurde schon von Newton einer eingehenden Untersuchung unterzogen, indem er eine sehr flache konvexe Glaslinse auf eine ebene Glasplatte preßte; es zeigen sich um die Berührungsstelle viele hellere und dunklere farbige Ringe, die eine Art Spektrum bilden, die Newtonschen Farbenringe.

Mittels des Spiegelversuches gelang es Fresnel, die Länge der Wellen der verschiedenen einfachen (Spektral-) Farben zu berechnen.

Farbe	Wellenlänge in Tausendstel mm	Schwingungszahl in Billionen pro 1″
Rot B	0,6878	448
Rot C	0,6564	472
Gelb D	0,5888	526
Grün E	0,5620	589
Hellblau F	0,4843	640
Tiefblau G	0,4291	722
Violett H	0,3929	790

Da jede Welle, gleichgültig ob kurz oder lang, sich in demselben Medium gleich rasch fortpflanzt (308 000 *km* in 1″), so hat die kürzeste Welle (violett) auch die größte Schwingungszahl.

Die sichtbare rote Grenze des Sonnenspektrums hat 0,81 μ (μ = Mikron = Tausendstelmillimeter); die äußerste Grenze des Ultrarot des Sonnenspektrums hat 2,7 μ. Alle jenseits dieser Grenze liegenden Strahlen kommen von der Sonne nicht bis zu uns, sondern werden absorbiert; umgekehrt: alle solche von der Erde ausgehende Strahlen gehen nicht in den Weltraum. Das Intensitätsmaximum einer Wärmequelle von 100° liegt bei 7,5 μ, das einer Wärmequelle von 0° bei 11 μ; es wurden schon Wellenlängen von 20—30 μ nachgewiesen (solche Länge haben Pilzsporen).

287. Beugung der Wellen.

Geht paralleles Licht durch einen schmalen Spalt, dessen Breite in der Figur 342 in AB gezeichnet ist, in einen dunklen Raum, so sollte es eigentlich nur den Teil des Schirmes erhellen, der von der geradlinigen Verlängerung des Lichtes getroffen wird. Man findet aber, daß dieser Teil noch eingefaßt ist mit abwechselnd hellen und dunklen Streifen, ähnlich den Interferenzstreifen, sieht also, daß das Licht von seiner geradlinigen Bahn abgelenkt ist, und nennt diesen Vorgang Beugung des Lichtes.

Diese Erscheinung hat man auf folgende Weise erklärt: Wenn in einem Punkte eine wellenförmige Bewegung existiert, so pflanzt sie sich nicht bloß in der Richtung fort, in der sie diesen Punkt erreicht hat, sondern von diesem Punkte geht, wie von einem Mittelpunkte aus, ein System kugelförmiger Wellen aus. So lange diese Bewegung im unbegrenzten Raume geschieht, schaut es so aus, als wenn die Wellenbewegung sich geradlinig fortgepflanzt hätte; denn wenn etwa eine von A ausgehende Wellenbewegung Fig. 340 sich bis zum Kreise (Kugelschale) BC fortgepflanzt hat, so daß in B und C gleichzeitig etwa Wellenberge sich befinden, und es entstehen nun um B und C und ebenso um alle (unendlich vielen) dazwischen

liegenden Punkte selbst wieder kreis- (kugel-) förmige Wellen, so haben sich diese nach Ablauf einer gewissen Zeit so weit fortgepflanzt, daß die Wellenberge derselben bis zur unteren Linie fortgerückt sind. Die vordersten Teile dieser Wellenberge verstärken sich zu einem Hauptwellenberg, der gerade so aussieht, wie wenn der Berg BC sich zur unteren Linie fortgepflanzt hätte; an den weiter rückwärts gelegenen Teilen interferieren sich die Berge schon mit den nachkommenden Thälern und bilden so den hinteren Abhang des Berges. Es kommen also die in jedem Punkte entstehenden Wellen nicht einzeln zum Vorschein, sondern nur als Gesamtwirkung, die so aussieht, als wenn sich die Welle von BC einfach fortgepflanzt hätte. Wenn aber der Raum, durch welchen die Welle eindringt, einseitig begrenzt ist, z. B. wenn eine Wasserwelle durch ein Schleusenthor eindringt, so sieht man, wie hinter dem Thore nach rechts und links die Wellenbewegung sich fortsetzt, gerade so, als wenn auf der ganzen Thorbreite eine wellenförmige Bewegung erregt würde; man sagt, die Welle wird gebeugt und dringt so auch in den Raum ein, der nicht in der geradlinigen Fortsetzung der ankommenden Welle liegt. Die Welle geht also auch um die Ecke; ebenso geht der Schall um die Ecke, und wenn auch das Licht nicht geradeso sich abbiegt, so nehmen wir doch in der Beugung des Lichtes eine Erscheinung wahr, die auf das engste damit verwandt ist.

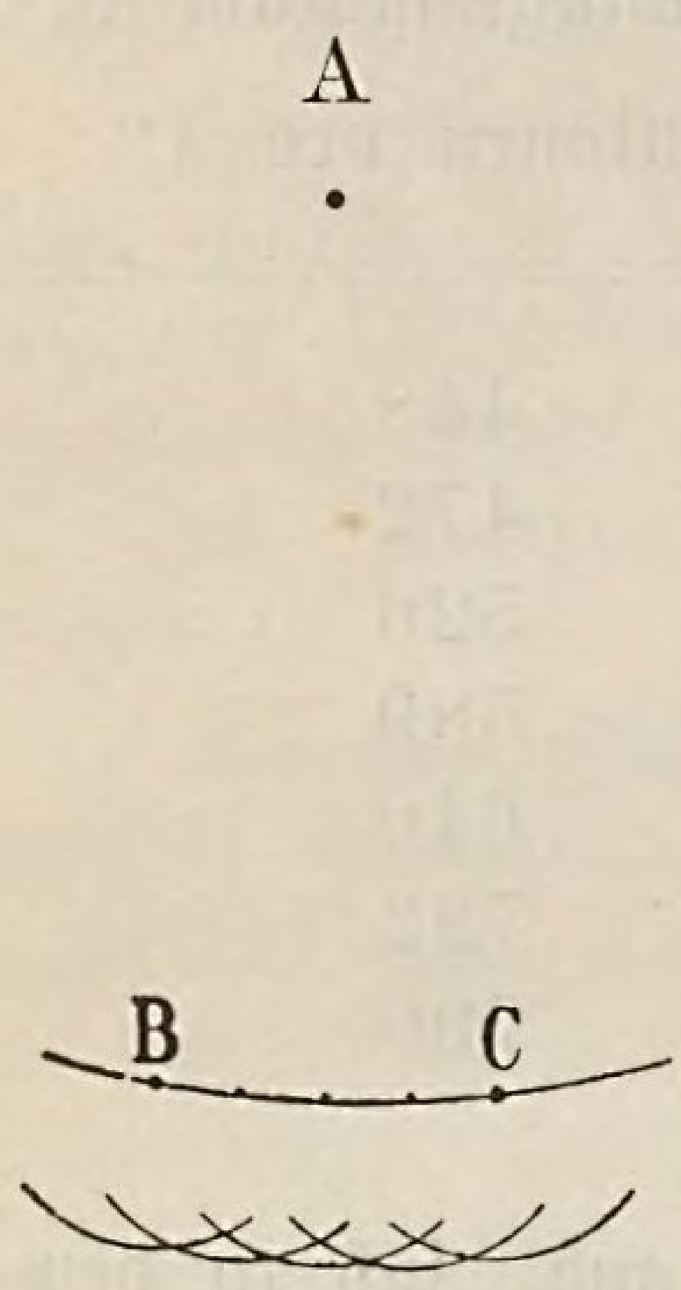
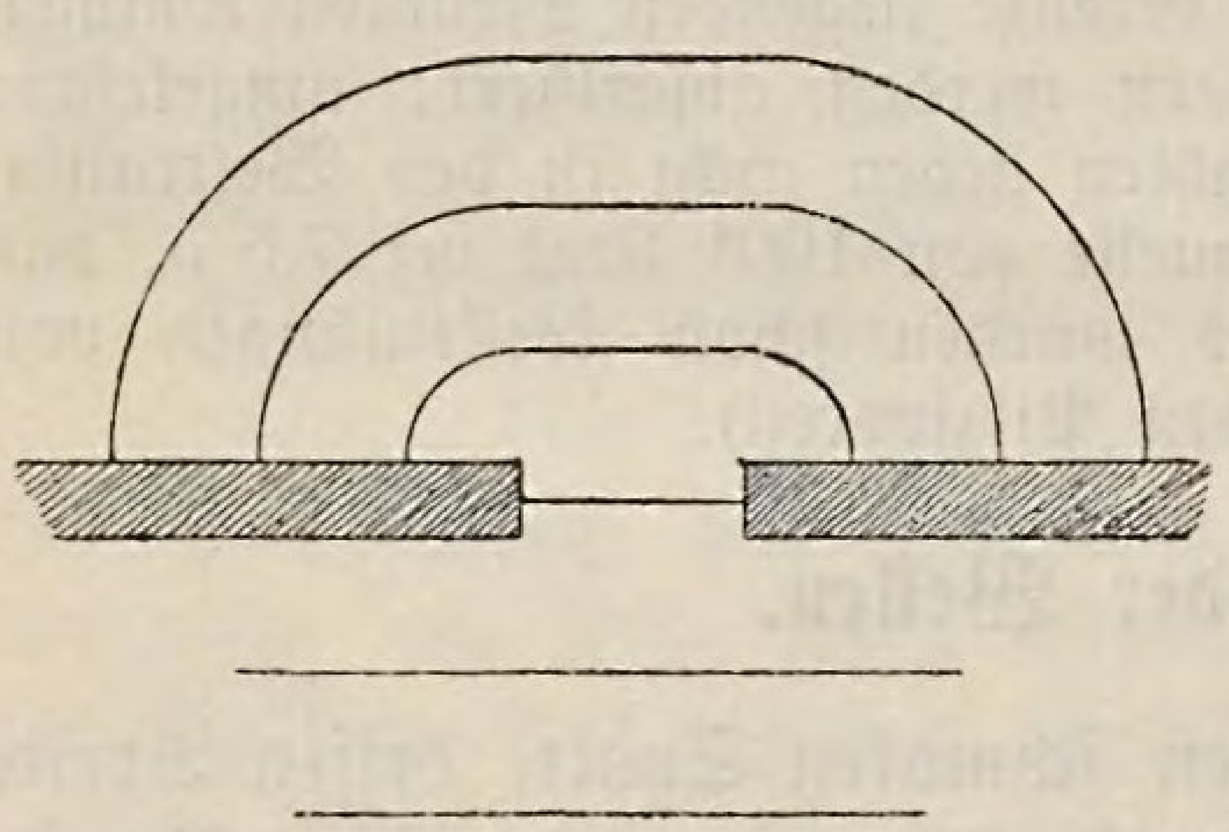


Fig. 340.


Fig. 341.

288. Beugung des Lichtes.

Kommt das Licht am Spalte AB an und hält man an der Vorstellung fest, daß nun von A und von B, sowie von allen zwischenliegenden Punkten sich kreis- (kugel-) förmige Wellensysteme ausbreiten, so werden sich dieselben interferieren. Im Punkte a treffen die von A und B kommenden Wellen nicht gleichzeitig an, sondern mit einem Gangunterschied, der der ungleichen Entfernung $aA > aB$ entspricht. Ist dieser Entfernungsunterschied etwa eine ganze Wellenlänge, so ist der Gangunterschied von $aA - aC$ eine halbe Wellenlänge und es gibt zu jedem Punkte zwischen A und B einen zweiten, so daß die von ihnen ausgehenden Wellen in a gerade einen Gangunterschied von einer halben Wellenlänge haben. Solche Wellen heben sich vollständig auf, in a ist es also ganz

dunkel. In b jedoch, wo der Unterschied bA — bB gleich zwei Wellenlängen ist, wo also bA — bC = 1 Wellenlänge ist, kommen stets Wellenpaare an, die sich durch eine ganze Wellenlänge unterscheiden, die sich also verstärken; es ist also in b hell, das Licht ist nach b hin gebeugt worden. So findet man, daß es in c dunkel, in e hell ist ꝛc., kann leicht mit dem Auge noch mehrere solche Interferenzstreifen unterscheiden und sieht so, wie das Licht gebeugt wird, um die Ecke geht. So ist die Erscheinung bei einfarbigem Lichte. Sie kann auch benützt werden, um die Wellenlänge des Lichtes zu berechnen (Fraunhofer). Bei violettem Lichte sind die Streifen schmäler, bei rotem Lichte breiter, und aus der Ableitung ist klar, daß die Streifen um so breiter werden, je schmäler der Spalt wird. Bei gemischtem, weißem Lichte entstehen eine Unzahl von Streifensystemen, die sich übereinander lagern, ihre Farben mischen und so ein System von farbigen Streifen erzeugen.

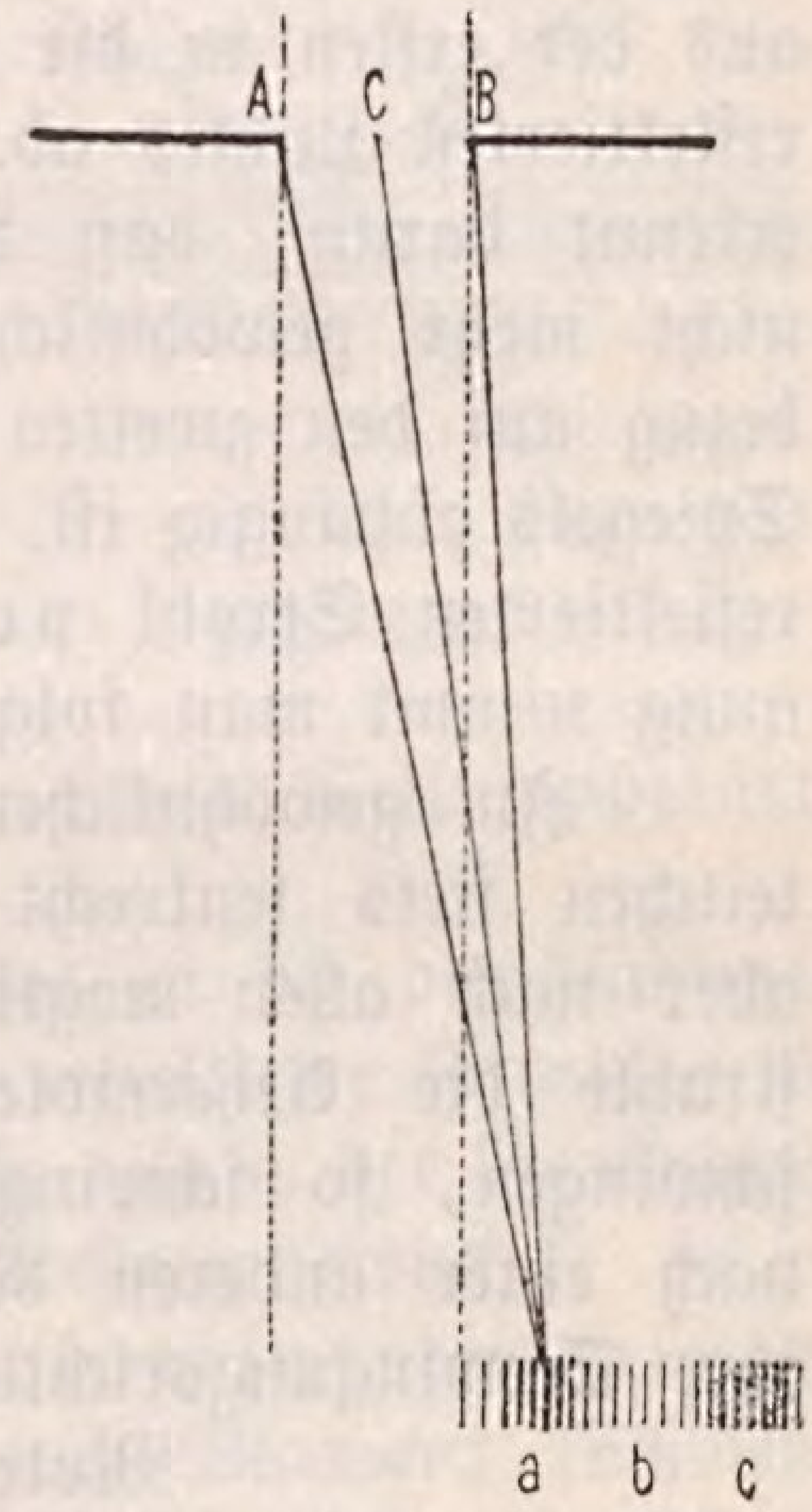


Fig. 342.

Nimmt man statt eines Spaltes deren mehrere, indem man sehr nahe neben einander parallele Striche auf Glas graviert, so sieht man die Beugungserscheinung, die farbigen Fransen, schon wenn man durch das Glas auf eine Kerzenflamme sieht. Eine ähnliche Erscheinung nimmt man wahr, wenn man durch eine Federfahne oder feinmaschiges Gewebe (Musselin) gegen das Licht blickt.

289. Polarisation des Lichtes.

Die Erscheinungen der Interferenz und Beugung haben erwiesen, daß das Licht eine Wellenbewegung ist, dagegen unentschieden gelassen, welcher Art die Schwingungen sind, ob sie nämlich longitudinal oder ob sie transversal sind. Die nachfolgenden Erscheinungen der Polarisation entscheiden hierüber und lehren, daß bei Lichtwellen die Teilchen transversal schwingen.

Läßt man natürliches Licht auf eine spiegelnde Glasfläche fallen, so wird es reflektiert, gleichgültig, unter welchem Winkel es auffällt. Läßt man aber Licht unter einem Einfallswinkel von 55° auf eine Glasfläche fallen, so zeigt der reflektierte Strahl eine merkwürdige Eigentümlichkeit; läßt man nämlich diesen reflektierten Strahl auf einen zweiten Spiegel auch unter 55° auffallen, so daß die Ebenen beider Spiegel parallel, oder daß wenigstens die Reflexions=

Ebenen beider Spiegel zusammenfallen, so wird der reflektierte Strahl vom zweiten Spiegel auch reflektiert; dreht man aber den zweiten Spiegel so, daß die Reflexionsebenen beider Spiegel aufeinander senkrecht stehen, so wird der reflektierte Strahl vom zweiten Spiegel nicht mehr reflektiert. Während der Drehung des zweiten Spiegels aus der ersten in die zweite Lage nimmt die Stärke des von ihm reflektierten Lichtes ab. (Nörrembergs Polarisationsapparat). Man erkennt daran, daß der vom ersten Spiegel reflektierte Lichtstrahl nicht mehr gewöhnliches Licht ist, da seine Reflexionsfähigkeit in bezug auf den zweiten Spiegel beschränkt, von der Lage des zweiten Spiegels abhängig ist, und nennt deshalb diesen vom ersten Spiegel reflektierten Strahl **polarisiert**. Zur Erklärung dieser Erscheinung nimmt man folgendes an.

Im gewöhnlichen Lichte erfolgen die Schwingungen der Ätherteilchen stets senkrecht zur Richtung des Lichtstrahles, transversal, aber nach allen möglichen Seiten hin; wenn also in einem Lichtstrahle die Äthermoleküle jetzt eben in einer gewissen Richtung schwingen, so schwingen sie an dieser Stelle im nächsten Moment nach einer anderen Richtung und wechseln so in raschester Folge ihre Schwingungsrichtung. Ist aber Licht so beschaffen, daß alle

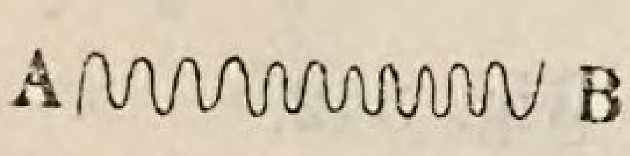


Fig. 343.

Moleküle stets nur nach einer Richtung hin schwingen, so sagt man, das Licht ist polarisiert; eine Ebene, welche den Lichtstrahl enthält und senkrecht steht zur Schwingungsrichtung, nennt man die **Polarisationsebene**. Wenn also die Moleküle in der Ebene dieses Papieres schwingen, so ist das Licht polarisiert senkrecht zu dieser Papierfläche, die Polarisationsebene geht durch AB und steht senkrecht zur Papierfläche.

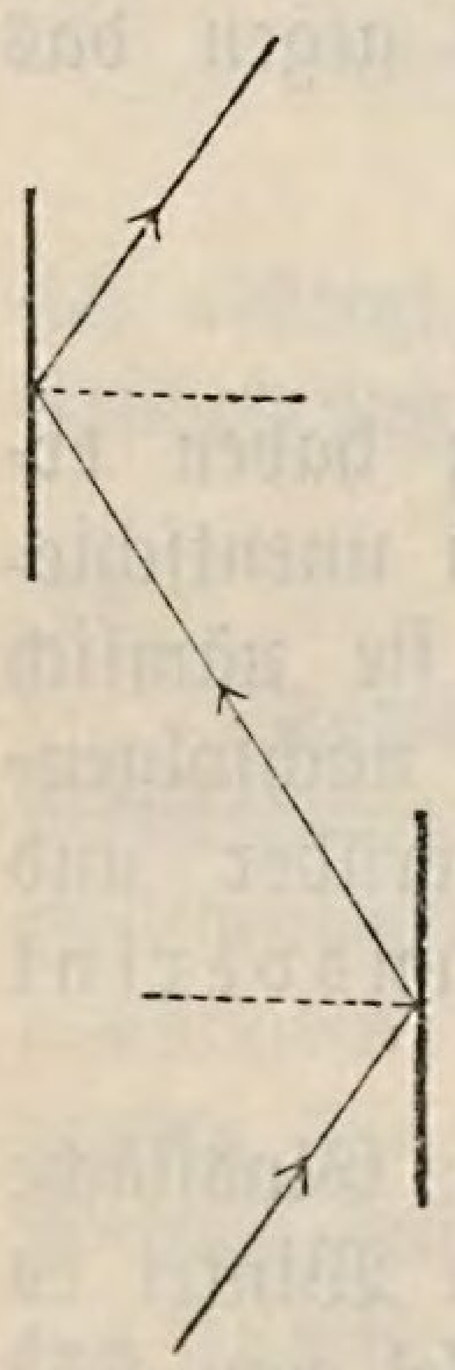


Fig. 344.

Wird das Licht von Glas unter 55° reflektiert, so ist es polarisiert; man weiß zwar nicht, ob in der Einfallsebene oder senkrecht zu derselben, doch nimmt man an, es sei in der Einfalls- (Reflexions-) Ebene polarisiert; die Schwingungen geschehen also senkrecht zur Einfallsebene, also senkrecht zur Papierfläche der Figur 344.

Solches polarisiertes Licht wird von einem zweiten Spiegel nur dann am stärksten reflektiert, wenn die Einfallsebene wieder mit der Polarisationsebene zusammenfällt; ist aber die Einfallsebene senkrecht zur Polarisationsebene (zweite Stellung des 2. Spiegels), so wird das Licht gar nicht mehr reflektiert. In jeder Zwischenstellung reflektiert der 2. Spiegel weniger als in der ersten Stellung, und dies reflektierte Licht ist nun auch wieder in der Reflexionsebene polarisiert.

Von dem auf den ersten Spiegel fallenden Lichte wird nur ein Teil reflektiert, der andere Teil wird durchgelassen (vorausgesetzt, daß der Glasspiegel unbelegt ist). Auch das durchgelassene, gebrochene Licht ist polarisiert, aber senkrecht zur Einfallsebene, d. h. seine Schwingungen geschehen in der Einfalls=(Papier=)ebene. Fig. 345.

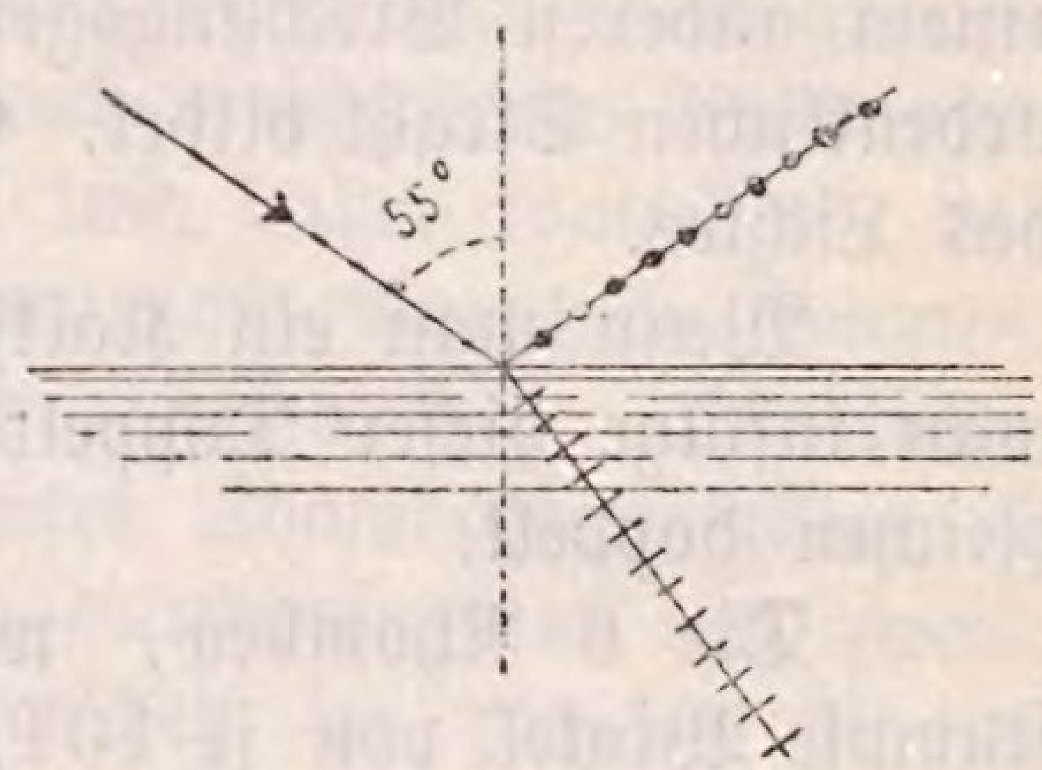


Fig. 345.

Wenn der Einfallswinkel des natürlichen Lichtes bei Glas mehr oder weniger als 55° beträgt, so wird das Licht nicht vollständig polarisiert, d. h. sowohl das einfallende als das gebrochene verhält sich so, als wenn es bestände aus einem Teil polarisierten und einem Teil unpolarisierten Lichtes.

Die Polarisation des reflektierten Lichtes ist bei durchsichtigen Substanzen nur dann vollständig, wenn der reflektierte Strahl senkrecht steht auf dem gebrochenen Strahle. Ist also n der Brechungsexponent und α dieser Einfallswinkel (oder Reflexionswinkel), so ist $\operatorname{tg} \alpha = n$. Dieser Einfallswinkel wird Polarisationswinkel genannt. Bei vielen Substanzen, zu denen auch Diamant, Schwefel und die Metalle gehören, wird nie alles reflektierte Licht poralisiert, jedoch liefert der Polarisationswinkel das Maximum des polarisierten Lichtes.

Das durchgelassene Licht ist nie vollständig polarisiert, denn es enthält nur so viel polarisiertes als das reflektierte, ist ihm aber an Quantität überlegen; der Überschuß ist unpolarisiert. Wird dies durchgelassene Licht nochmal durch eine parallele Platte gelassen, so wird der schon polarisierte Teil ganz durchgelassen, vom unpolarisierten wird ein Teil polarisiert; das durchgelassene ist also jetzt vollständiger polarisiert und kann, wenn man es oftmals durch solche Platten durchgehen läßt, immer vollständiger polarisiert werden.

290. Doppelbrechung des Lichtes.

Ein eigentümliches Vorkommnis zeigt sich, wenn man Licht durch ein Kalkspatrhomboeder gehen läßt. Aus den natürlichen Kalkspatkrystallen lassen sich nämlich durch Spaltung Rhomboeder herstellen, und wenn man nun ein Bündel paralleler Lichtstrahlen sogar senkrecht auf eine Seitenfläche des Rhomboeders fallen läßt, so sieht man auf der gegenüberliegenden Fläche zwei getrennte Lichtstrahlen heraustreten. Der eine ist die Fortsetzung des einfallenden Lichtes, wie er sich bei senkrechter Incidenz bilden muß, und wird der ordentliche Strahl genannt; der andere ist dem ersten parallel, doch etwas seitlich verschoben, und wird der außerordentliche Strahl genannt. Der außerordentliche Strahl kann also nur dadurch ent=

standen sein, daß von dem einfallenden Lichte der eine Teil nach gewöhnlichen Brechungsgesetzen gebrochen, also bei senkrechter Incidenz gar nicht gebrochen wurde, der andere Teil aber nach einem anderen Brechungsgesetze abgelenkt wurde und so den außerordentlichen Strahl bildet. Es zeigt sich also eine Doppelbrechung des Lichtes.

Wenn man ein Kalkspatrhomboeder auf Papier legt, so sieht man infolge dieser Doppelbrechung die auf dem Papier befindlichen Zeichen doppelt.

Die 6 Rhomben, welche das Rhomboeder begrenzen, haben stumpfe Winkel von je 101,5°, und nur an zwei gegenüberliegenden Ecken stoßen je 3 stumpfe Winkel zusammen; die Verbindungslinie dieser Ecken ist die krystallographische und zugleich die optische Achse des Kalkspates, und jede Ebene, welche durch sie gelegt wird, heißt ein Hauptschnitt. Liegt das Rhomboeder, wie vorhin, auf dem Papier mit einer Fläche, so steht die Achse schief zur Papierfläche; der Hauptschnitt, welcher hier in Betracht kommt, enthält diese Achse (oder eine dazu parallele) und steht senkrecht auf der Papierfläche; es zeigt sich, daß der außerordentliche Strahl im Hauptschnitt verschoben ist, daß er sogar bei senkrechter Incidenz um 6° 14′ in der Ebene des Hauptschnittes abgelenkt wird, deshalb neben dem ordentlichen austritt und beim Austritt ihm wieder parallel wird. Wenn man demnach das auf dem Papier liegende Rhomboeder dreht, so ändert der Hauptschnitt seine Richtung und damit auch der außerordentliche Strahl. Ist auf dem Papier ein Punkt gezeichnet, so sieht man durch das Rhomboeder zwei Punkte, und beim Drehen desselben bleibt der eine Punkt, der dem ordentlichen Strahle entspricht, ruhig, während der andere, welcher dem außerordentlichen Strahle entspricht, in einem kleinen Kreise um ihn herumwandert.

Jede Doppelbrechung ist zugleich mit Polarisation verbunden derart, daß der ordentliche Strahl im Hauptschnitt polarisiert ist, daß also bei ihm die Ätherteilchen in einer zum Hauptschnitt senkrechten Richtung schwingen, während der außerordentliche Strahl senkrecht zum Hauptschnitt polarisiert ist, so daß also bei ihm die Ätherteilchen in der Ebene des Hauptschnittes schwingen. Die Polarisation beider Strahlen ist dabei stets eine vollständige.

Zur Erklärung dieser Erscheinungen nimmt man an, daß infolge der besonderen Anordnung der Moleküle im Krystalle die Ätherteilchen überhaupt nur in zwei Richtungen schwingen können, parallel dem Hauptschnitt und senkrecht dazu, daß deshalb, wenn gewöhnliches Licht in den Krystall eindringt, jeder Lichtstrahl, welcher nicht schon in einer dieser Richtungen schwingt, in zwei Strahlen zerlegt wird, die eben in diesen Richtungen schwingen. Da nun im

gewöhnlichen unpolarisierten Lichte die Teilchen nach allen möglichen Richtungen schwingen und keine Richtung bevorzugen, so entstehen durch die Zerlegung zwei polarisierte Strahlen von gleicher Stärke. Nun hat der Kalkspat aber auch noch verschiedenes Brechungsvermögen für beide polarisierte Strahlen und daher kommt es, daß sie sich im Krystalle trennen und gesondert zum Vorschein kommen.

Läßt man nun polarisiertes Licht, etwa den ordentlichen Strahl eines Rhomboeders, auf ein zweites Rhomboeder fallen, so daß deren Hauptschnitte parallel sind, so durchdringt er das zweite Rhomboeder ungehindert, weil seine Teilchen im zweiten Rhomboeder ebenso weiterschwingen können, wie sie den ersten verlassen haben, es erscheint also nur ein Strahl und zwar ein ordentlicher; dreht man aber das zweite Rhomboeder nun um 90°, so kann der ordentliche Strahl des ersten nicht mehr als solcher das zweite Rhomboeder durchdringen; denn seine Teilchen, die zuerst in einer zum Hauptschnitt senkrechten Richtung geschwungen haben, schwingen nun im zweiten Rhomboeder in dessen Hauptschnitt, bilden also einen außerordentlichen Strahl und durchdringen so mit Ablenkung das zweite Rhomboeder. Während man aber das zweite Rhomboeder so dreht, nachdem man es etwa um 45° gedreht hat, tritt stets wieder Doppelbrechung ein; denn der ordentliche polarisierte Strahl des ersten Rhomboeders findet nun das zweite Rhomboeder in einer solchen Lage, daß er nicht in derselben Richtung weiter schwingen kann; deshalb zerlegt sich jeder Strahl wieder in 2 Strahlen, einen ordentlichen und einen außerordentlichen, von denen bei dieser Drehung der ordentliche an Stärke abnimmt, während der außerordentliche zunimmt.

Alle nicht dem regulären System angehörigen Krystalle zeigen Doppelbrechung; unter ihnen ist besonders der Turmalin ausgezeichnet dadurch, daß er den außerordentlichen Strahl besser durchläßt, als den ordentlichen, so daß oft schon eine einzige Turmalinplatte genügt, den ordentlichen Strahl ganz auszulöschen. Legt man zwei solche Turmalinplatten so auf einander, daß die Hauptschnitte parallel sind, so erscheint beim Durchsehen das Gesichtsfeld hell, weil der außerordentliche Strahl der ersten auch als solcher die zweite durchdringt; dreht man die zweite um 90°, so erscheint das Gesichtsfeld dunkel, weil nun der außerordentliche Strahl der ersten Platte die zweite als ordentlicher durchdringen sollte, hiebei aber ganz absorbiert wird.

Die absoluten Maßeinheiten.

291. Die mechanischen Einheiten.

Man hat in neuester Zeit zur Messung physikalischer Größen Maßeinheiten eingeführt, welche möglichst wenig willkürliche An=

nahmen haben und aus den einfachsten Einheiten auf die einfachste Weise abgeleitet sind.

Man hat nur 3 Einheiten willkürlich angenommen, nämlich

1) das Centimeter C als Längeneinheit,
2) das Gramm G als Masseneinheit und
3) die Sekunde S als Zeiteinheit.

Diese 3 Einheiten heißen die absoluten Einheiten; aus ihnen werden alle anderen Maßeinheiten abgeleitet und heißen deshalb abgeleitete Einheiten, und das ganze System von Maßeinheiten, das man auf diese Weise erhält, heißt das absolute Maßsystem oder das Centimeter-Gramm-Sekunden-System (CGS-System).

Geschwindigkeitseinheit ist diejenige Geschwindigkeit, bei welcher in der Zeiteinheit S die Wegeinheit C zurückgelegt wird.

Krafteinheit ist diejenige Kraft, welche, wenn sie konstant während 1 Sekunde auf die Masse von 1 G wirkt, diesem die Geschwindigkeitseinheit (1 C pro 1 S) erteilt. (Kraft 1 gibt der Masse 1 in der Zeit 1 die Geschwindigkeit 1.)

Diese Krafteinheit ist verhältnismäßig sehr klein; denn wenn, wie beim freien Falle die Kraft von 1 *g* auf die Masse von 1 *g* während 1″ wirkt, so erteilt sie dem *g* eine Geschwindigkeit von 9,81 *m* (ca.), also von 981 *cm* (ca.); die Krafteinheit soll aber dem *g* bloß eine Geschwindigkeit von 1 *cm* erteilen, also ist die Krafteinheit 981 mal kleiner als die Schwerkraft von 1 *g*. Die Krafteinheit ist also ungefähr so groß wie die Kraft, mit welcher die Erde ein Milligramm anzieht. Die Kraft von 1 *kg* enthält also ca. 981000 Krafteinheiten.

Die Arbeitseinheit ist die Arbeit, welche die Krafteinheit verrichtet, wenn sie längs der Wegeinheit (*cm*) wirkt.

Auch diese Arbeitseinheit ist recht klein, denn die Arbeit von 1 *kgm* enthält ca. $981000 \cdot 100 = 98100000$ Arbeitseinheiten.

292. Die elektrostatischen Einheiten.

Die absoluten Einheiten sind insbesondere zur Messung elektrischer und magnetischer Größen eingeführt und für dieselben ganz besonders passend. Man unterscheidet zweierlei Arten elektrischer Maßeinheiten, nämlich die elektrostatischen und die elektromagnetischen Einheiten; dazwischen werden wir noch die magnetischen Einheiten einschieben.

1. Einheit der Menge oder Quantität der Elektrizität ist diejenige Menge, welche eine gleich große Menge, welche 1 *cm* von ihr entfernt ist, mit der Krafteinheit abstößt (oder anzieht, wenn sie entgegengesetzter Art ist). Jede Menge muß dabei auf einen Punkt konzentriert sein. (Mengeneinheit zieht eine gleich große Menge in der Abstandseinheit mit der Krafteinheit an.)

2. Einheit der Potenzialdifferenz. Sind zwei Leiter nicht mit Elektrizität von derselben Spannung geladen, so daß also, wenn man die Leiter durch einen Draht verbindet, Elektrizität vom einen zum andern Leiter überfließt, bis beide gleiche Spannung haben, so sagt man, es ist zwischen den beiden Leitern eine Potenzialdifferenz vorhanden, oder sie haben verschiedenes Potenzial. Ein solches Fließen der Elektrizität findet nur dann statt, wenn eine Potenzialdifferenz vorhanden ist, und durch das Fließen leistet die Elektrizität Arbeit. Durch diese Arbeit kann die Potenzialdifferenz gemessen werden, indem man sagt: zwischen zwei Punkten herrscht die Einheit der Potenzialdifferenz, wenn die herüberströmende Einheit der elektrischen Mengeneinheit gerade die Arbeitseinheit leistet. Sind zwei Kugeln, etwa von gleicher Größe, mit Elektrizität geladen, aber verschieden stark, oder sogar mit verschiedener Elektrizität, und werden sie durch irgend welche Ursache stets in dieser Ladung erhalten (etwa durch Drehen einer Elektrisiermaschine) und verbindet man sie nun durch einen Draht, so strömt Elektrizität über und zwar gleichmäßig, da wir annehmen, daß beide Kugeln stets auf derselben Spannung erhalten werden und langsam oder rasch je nach dem Widerstande oder nach dem Grade des Unterschiedes im elektrischen Zustande beider Kugeln. Jede Mengeneinheit der Elektrizität, die so herüberfließt, leistet eine bestimmte Arbeit, mehr oder weniger, je nachdem der Unterschied in den Ladungen beider Kugeln groß oder klein ist. Wenn nun jede Elektrizitätsmengeneinheit gerade eine Arbeitseinheit leistet, dann herrscht zwischen beiden Kugeln die Einheit der Potenzialdifferenz.

3. Widerstandseinheit ist derjenige Widerstand, welcher zwischen zwei Punkten von der Potenzialdifferenz 1 vorhanden sein muß, damit die Mengeneinheit gerade in der Zeiteinheit (1 Sek.) herüberfließt.

4. Der hiebei entstandene Strom ist die Stromeinheit. Haben also zwei Punkte die Potenzialdifferenz 1, zwischen sich den Widerstand 1, so läuft in der Zeit 1 die Quantität 1 herüber, liefert die Arbeit 1, und stellt den Strom 1 vor.

Aus folgenden Beispielen gewinnt man eine ungefähre Vorstellung von der Größe der eben definierten Einheiten. Wenn man 268 Daniellsche Elemente hintereinander (auf elektromotorische Kraft) schaltet, den einen freien Pol zur Erde ableitet und den anderen mit der Kugel von 2 *cm* Durchmesser verbindet, so erhält diese Kugel die elektrische Mengeneinheit zugleich auf der Einheit des Potenzials. Die Widerstandseinheit ist gleich dem einer Quecksilbersäule von 100 000 000 Kilometer Länge und $\frac{1}{1000}$ Quadratmillimeter Querschnitt, ist also ca. 10^{14} S. E. Werden die Pole

obiger Batterie durch diesen Widerstand verbunden, so fließt durch ihn die Stromeinheit, es wird also pro Sek. eine Arbeitseinheit geleistet.

Die magnetischen Einheiten.

Einheit der magnetischen Menge besitzt ein Magnetpol, wenn er einen gleich starken, in 1 *cm* Entfernung befindlichen Pol mit der Krafteinheit anzieht (oder abstößt).

Ein Magnetpol beherrscht den ihn umgebenden Raum derart, daß er jeden in seinen Bereich kommenden anderen Magnetpol abstößt (oder anzieht). Die Größe dieser Anziehung ist abhängig von der Stärke des anziehenden Magnetismus und von der Entfernung des angezogenen. Sucht man in der Umgebung eines Magnetpoles alle Stellen, in denen die Größe oder Intensität der magnetischen Anziehung dieselbe ist, so findet man als geometrischen Ort eine Fläche, welche den Pol einhüllt. Sucht man für jeden Intensitätsbetrag eine solche Fläche, so erhält man eine Anzahl Flächen von je gleicher Anziehung oder magnetischer Intensität und nennt diese Flächen magnetische Felder. Ein Feld hat die Intensität 1, wenn ein in diesem Feld befindlicher Pol 1 vom anziehenden Magnetpol mit der Kraft 1 angezogen wird.

293. Die elektromagnetischen Einheiten.

Sie werden besonders benützt zur Messung der galvanischen Ströme.

1) Stromstärkeeinheit hat der Strom, welcher, indem er die Längeneinheit durchfließt, auf einen 1 *cm* entfernten Magnetpol von der Stärke 1 die Krafteinheit ausübt. Man denke sich also einen Draht von 1 *cm* Länge so gebogen, daß er einen Kreisbogen von 1 *cm* Radius bildet. Im Zentrum dieses Kreises sei ein Magnetpol von der Stärke 1 angebracht. Fließt nun durch den Draht ein galvanischer Strom, so wirkt er abstoßend auf den Magnetpol mit einer gewissen Kraft; ist diese Kraft 1, so ist auch der Strom 1.

2) Elektrische Mengeneinheit ist diejenige Menge, welche in einer Sekunde durch den Strom von der Stärke 1 geliefert wird.

3) Elektromotorische Krafteinheit herrscht zwischen zwei Punkten, wenn die zwischen ihnen herüberfließende Mengeneinheit gerade die Arbeitseinheit leistet.

In einem Elemente etwa herrscht an der Trennungs- (Berührungs-)fläche von Zink und Flüssigkeit eine elektromotorische Kraft, welche die Elektrizitäten von bestimmtem Spannungsunterschiede herstellt (oder der etwa von anderswoher fließenden Elektrizität einen Spannungsunterschied gibt); infolge dieses Spannungsunterschiedes fließt dann die Elektrizität durch den Stromkreis, indem

sich nach den Ohmschen Gesetzen das Gefälle herstellt und der Spannungsunterschied sich ausgleicht. Bei diesem Fließen wird Arbeit geleistet, und wenn die Mengeneinheit beim Fließen gerade die Arbeitseinheit leistet, so haben die zwei Punkte, zwischen denen das Fließen betrachtet wird, eine Potenzialdifferenz 1, und wenn an diesen Punkten die elektromotorische Kraft selbst vorhanden ist, so sagt man, dort ist die elektromotorische Kraft 1. Wenn etwa die elektromotorische Kraft eines Elementes so groß ist, daß die elektrische Mengeneinheit im ganzen Stromkreis (innerer und äußerer zusammen) 3 Arbeitseinheiten leistet, so sagt man, die elektromotorische Kraft dieses Elementes hat 3 Einheiten. Ist dabei von dem Gefälle, das sich nach dem Ohmschen Gesetzen bildet, das eine Drittel im Innern des Elementes, also in der Flüssigkeit, so herrscht zwischen den Polen (Zink und Kupfer) im äußeren Schließungskreis nur mehr die Potenzialdifferenz 2, und die durch den äußeren Schließungskreis fließende Mengeneinheit leistet dort nur mehr 2 Arbeitseinheiten, da sie die dritte Arbeitseinheit im Innern des Elementes leistet.

4) Widerstandseinheit ist der Widerstand, der zwischen zwei Punkten von der Potenzialdifferenz 1 gerade den Strom 1 herüberfließen läßt.

Liefert also ein Element gerade die elektromotorische Kraft 1, und ist der Widerstand 1, so fließt in 1 Sekunde die Menge 1 herüber, leistet die Arbeit 1 und stellt den Strom 1 vor.

Diese Einheiten sind von denen des elektrostatischen Systems der Größe nach wesentlich verschieden, und zwar ist die Mengeneinheit des elektromagnetischen Systems 28 800 000 000 mal größer (v mal größer) als die des elektrostatischen Systems; ebenso ist die Stromstärke v mal größer, dagegen die elektromotorische Kraft v mal kleiner und der Widerstand v^2 mal kleiner.

294. Die praktischen Einheiten.

Die bisher besprochenen Einheiten sind für praktische Anwendungen sehr unbequem, weil sie der Größe nach zu sehr verschieden sind von den gewöhnlich der Messung unterliegenden Größen. Man hat deshalb sogenannte praktische Einheiten eingeführt. Diese sind:

1) Das Weber, die praktischen Einheit für die magnetische Quantität, sie ist $= 10^8$ absolute Einheiten der magnetischen Quantität.

2) Das Ohm, die praktische Einheit für den Widerstand; sie ist $= 10^9$ Widerstandseinheiten des elektromagnetischen Systems: das Ohm ist nahe verwandt mit der Siemens-Einheit; 1 Ohm = 1,06 S. E. Die Widerstandseinheit des elektromagnetischen Systems ist also sehr klein, ca. 1 Tausendmillionstel von 1 S. E.

3) Das Volt (abgekürzt von Volta), die praktische Einheit der elektromotorischen Kraft; sie ist $= 10^8$ elektromotorischen Krafteinheit des elektromagnetischen Systems. Das Volt ist nahe verwandt mit der elektromotorischen Kraft eines Daniellelementes, es ist ca. 5—10% kleiner als 1 Daniell. Die elektromotorische Krafteinheit des elektromagnetischen Systems ist also sehr klein, ca. 1 Hundertmillionstel eines Daniell.

4) Das Ampère, die praktische Einheit der Stromstärke, sie ist $= \frac{1}{10}$ der Stromstärkeeinheit des elektromagnetischen Systems.

Das Coulomb, die praktische Einheit der Quantität; sie ist $= \frac{1}{10}$ Quantitätseinheit des elektromagnetischen Systems.

Diese praktischen Einheiten sind so gewählt, daß bei 1 Volt elektromotorischer Kraft und 1 Ohm Widerstand eine Stromstärke von 1 Ampère entsteht, also eine Menge von 1 Coulomb pro 1″ durchfließt. (1 Volt gibt in 1 Ohm 1 Amp. und liefert 1 Coulomb). Die dadurch erzeugte Arbeit beträgt 10^7 Arbeitseinheiten des absoluten Systems und wird 1 Watt genannt. 1 Watt $= 10^7$ Arbeitseinheiten. Da nun 1 *kgm* $= 10^7 \cdot 9{,}81$ Arbeitseinheiten ist, so ist 1 *kgm* $= 9{,}81$ Watt.

Die Arbeitsleistung eines galvanischen Stromes wird gemessen durch das Produkt aus Stromstärke mal elektromotorischer Kraft. Mißt man diese durch Amp. und Volt, so ist die Arbeit = Amp. Volt. für jede Sekunde; und da 1 Amp. Volt = 1 Watt, so findet man die Arbeit eines galvanischen Stromes in Watt durch das Produkt aus Amp. Volt. Wenn z. B. die Stromstärke einer Dynamomaschine 30 Amp. und die Spannungsdifferenz an den Klemmschrauben 54 Volts beträgt, so ist die Arbeit, die dieser Strom im äußeren Schließungkreis (von Klemme zu Klemme) leistet $= 30 \cdot 54 = 1620$ Watt in jeder Sekunde. Es gehen nun 735 Watt auf eine Pferdekraft, also ist die äußere Arbeit dieser Maschine $= \frac{1620}{735} = 2, . .$ Pferdekräfte. Also Pferdekr. $= \frac{\text{Amp. Volt.}}{735}$. (Die englische Pferdekraft (horse power = HP) = 746 Watts, also HP $= \frac{\text{Amp. Volts}}{746}$).

Wir haben gesehen, daß Wärme durch Arbeit erzeugt werden kann, und zwar ist:

1 Calorie = 424 *kgm* = 41 590 000 000

absoluten Arbeitseinheiten.

Man nimmt im absoluten Maßsystem als Wärmeeinheit diejenige Wärmemenge, welche 1 *g* Wasser um 1° C erwärmt; dann ist 1 Wärmeeinheit = 41 590 000 abs. Arb. einh. = 0,424 *kgm*.

Aufgaben.

1. Zeichne die Resultierende zweier Kräfte $P_1 = 7$, $P_2 = 5$, wenn sie einen Winkel von 90°, von 45°, von 120° einschließen.

2. Zwei Kräfte $P_1 = 11$ und $P_2 = 27$ wirken unter einem gegebenen Winkel. Suche durch Zeichnung die Größe und Richtung einer Kraft welche noch hinzugefügt werden muß, damie alle drei sich im Gleichgewichte halten.

3. Wie muß Figur 2 ausschauen, wenn links 3 *kg*, rechts 4 *kg* und in der Mitte 5 *kg* hängen.

4. Bei welcher Stellung des Bootes in Figur 3 braucht man länger, um es über den Fluß zu rudern?

5. Auf einer schiefen Ebene von 30° liegt eine Last von 80 *kg*; in welche Seitenkräfte zerlegt sie sich?

6. Zeichne Figur 5 mehrmals, wobei E verschiedene Entfernungen von D hat.

7. Wenn in Figur 7 der Hebelarm links 15 *cm*, rechts rechts 40 *cm* lang ist, und links 100 *kg* hängen, welche Kraft muß rechts wirken?

8. An einem Hebelarm von 5 *cm* hängt eine Last von 340 ℔; wie lang muß man den andern Arm machen, um mit einer Kraft von 12 ℔ das Gleichgewicht herzustellen?

9. Ein Baumstamm von 3 Ztr. Gewicht liegt auf einer 2,8 *m* langen Stange 50 *cm* von ihrem einen Ende. Mit welcher Kraft muß man das andere Ende heben, um den Baumstamm zu heben? Wo muß der Baumstamm aufliegen, damit man mit 15 *kg* ausreicht?

10. Warum hat die Papierscheere kurze Arme und lange Backen, und warum hat die Blechscheere lange Arme und kurze Backen?

11. Am freien Seilende eines Flaschenzuges von je 3 Rollen ziehen 4 Männer mit je 35 ℔ Zugkraft. Wie schwer darf die Last sein, wenn 1/5 der Zugkraft verloren geht?

12. Bei der Erdwinde, Figur 15, ist die Welle 28 *cm* dick; die Kurbel 45 *cm* lang. Welche Kraft kann eine Last von $2^1/_2$ Ztr. heben?

13. An einem Drillbaum drehen 3 Männer an Armen von je 2,2 *m* Länge mit einer Kraft von je 35 ℔, während das Seil um eine Welle von 80 *cm* Durchmesser geschlungen ist. Welche Last können sie heben, wenn $^1/_6$ ihrer Kraft durch Reibung verloren geht?

14. Ein Mann hat in achtstündiger Arbeit einen Wasserbehälter von 300 *hl* aus einem 7 *m* tiefen Brunnen gefüllt. Wie groß ist seine ganze, seine stündliche, seine sekundliche Arbeit?

15. Ein Pferd zieht einen Wagen von 12 Ztr. Gewicht und braucht dazu eine Kraft, welche gleich $^1/_8$ der Last ist. Es zieht ihn in einer Stunde 2,5 *km* weit. Wie groß ist die ganze Arbeit und die Leistung in einer Sekunde?

16. Wie viel Wasser kann ein Pumpwerk von 4 Pferdekräften in 9 Stunden aus einem Brunnen von 6 *m* Tiefe schöpfen und noch 15 *m* hoch heben?

17. Wenn ein Arbeiter eine Pumpenstange 8 Stunden lang je 35 mal in der Minute mit einer Kraft von 40 ℔ 25 *cm* tief niederdrückt, wie groß ist seine Gesamtarbeit? Wie groß ist die Leistung in 1″, und wie groß ist der Nutzeffekt, wenn durch Reibung $12^0/_0$ verloren gehen? Wie viel Wasser wird er in 5 Stunden auf 6 *m* Höhe befördern können?

18. Wie viel Pferdestärken muß eine Dampfmaschine haben, wenn durch sie in jeder Minute $4^1/_2$ *hl* Wasser 80 *m* hoch gehoben werden sollen, und für Arbeitsverlust $20^0/_0$ in Anschlag gebracht werden?

19. Welche Kräfte treffen in Figur 18 auf die Stützen, wenn die Last statt 30 *kg* 40 *kg* beträgt, und wie verteilt sich letztere, wenn sie die Stange in 2 *cm* und 8 *cm* teilt, oder in 4 *cm* und 6 *cm* teilt?

---

20. An der hydraulischen Presse, Figur 26, wirkt am Hebelende eine Kraft von 80 *kg*, während der kurze Hebelarm 5 mal kürzer ist; der Querschnitt des Preßkolbens ist 250 mal größer als der des Druckkolbens. Mit welcher Kraft wird der Preßkolben gehoben?

21. Wie groß ist der Bodendruck des Wassers auf eine rechteckige Fläche von 50 *cm* Länge und 36 *cm* Breite bei $5^1/_2$ *m* Wasserhöhe?

22. Eine Turbine wird mit 370 Sekundenlitern Wasser von 4,25 *m* Stauhöhe gespeist. Sie liefert 15 Pferdestärken. Wie viel Prozent Nutzeffekt hat sie?

23. Für ein oberschlächtiges Wasserrad steht ein Wasserlauf zur Verfügung, welcher in der Minute 15 *hl* führt und eine Stauhöhe von $5^1/_2$ *m* ermöglicht. Wie viel Pferdestärken läßt es erhoffen bei $70^0/_0$ Nutzeffekt?

24. Ein unterschlächtiges Wasserrad hat ca. $4^1/_2$ *m*, die Welle 40 *cm* Durchmesser, an ein um die Welle geschlungenes Seil muß man 180 *kg* hängen, damit ihr Gegendruck den Druck des Wassers aufhebt. Wie groß ist letzterer?

25. Ein Standglas mit Wasser wiegt 580 *g*; ich lege noch einen Stein von 90 *g* Gewicht ins Wasser, so wiegt es jetzt 670 *g*, obwohl der Stein wegen des Auftriebes nur einen Druck von 50 *g* auf den Boden des Standglases ausübt. Warum? Ich lasse den Stein an einem Faden in das Wasser dieses Standglases hängen, so wiegt es jetzt 620 *g*. Warum?

26. Wie groß ist das spezifische Gewicht eines Körpers, der in Luft 38,7 *g*, in Wasser 20,9 *g* wiegt?

27. Ein Glasballon wiegt leer 2,4 *kg*, faßt $23^1/_2$ *l* Wasser und wiegt mit Schwefelsäure gefüllt 45,7 *kg*. Wie groß ist das sp. G. der Schwefelsäure?

28. Wenn das sp. G. des Alkohols 0,795, das des Äthers 0,71 ist, wie groß ist das sp. G. des Alkohols in Bezug auf Äther, und wie groß ist das sp. G. des Äthers in Bezug auf Alkohol?

29. Ein Stück Butter wiegt in der Luft 14,56 *g*, ein Stück Eisen im Wasser 80,4 *g*; beide zusammen wiegen im Wasser 78,69 *g*; wie groß ist das sp. G. des Butters?

30. Was wiegt ein Zinkdach von 38,5 *m* Länge, 7,2 *m* Breite hergestellt aus Zinkblech von 0,8 *mm* Dicke, sp. G. 6,92, wenn für Überpfalzen der Bleche ca. 3% gerechnet werden?

31. Was wiegt eine Granitplatte von 2,64 *m* Länge, 1,04 *m* Breite, 16 *cm* Dicke und dem sp. G. 2,8?

32. Wie viel Zentner Mehl faßt eine Truhe von 2,16 *m* Länge, 85 *cm* Breite und 64 *cm* Tiefe? Sp. G. 0,92.

33. Welches Volumen hat wohl der große Eisenhammer von Krupp in Essen, welcher ca. 1000 Ztr. wiegt, und wie hoch muß er etwa sein, wenn er 1 *m* breit und 1 *m* dick ist?

34. Wie viel Liter Öl muß man aus einem Fasse nehmen, um $37^1/_2$ ℔ zu haben? Sp. G. = 0,915.

35. Wie hoch muß ein Bleigewicht werden, das bei 3 *cm* Breite und 2,4 *cm* Dicke $2^1/_2$ ℔ wiegen soll?

36. In eine viereckige Grube von 4,27 *m* Länge und 3,25 *m* Breite werden 16 Fuhren Erde à 30 Ztr. gefüllt. Wie hoch wird sie voll? Sp. G. = 1,4.

37. In A kostet der Doppelhektoliter Korn 27 ℳ 30 ₰, in B der Doppelzentner 15 ℳ 70 ₰; um wie viel Prozent ist es in B teurer als in A? Sp. G. = 0,72.

38. Welches sp. G. hat eine Mischung von 68 *g* Zinn und 40 *g* Blei? In welchem Verhältnis müssen die Stoffe gemischt werden, damit das sp. G. 8,1 wird.

39. Was geschieht, wenn ein Alkoholometer bei einem Standglas mit Wasser schwimmt, und auf das Wasser Petroleum gegossen wird? Was geschieht, wenn eine Salzspindel in Wasser schwimmt, und darauf Öl gegossen wird?

---

40. Wie viel Zentner Luft enthält ein Zimmer von 8,4 *m* Länge, 6,2 *m* Breite und 3,5 *m* Höhe?

41. Wie viel Liter Luftzufuhr braucht ein Ofen in jeder Minute, wenn in ihm in der Stunde 6 *kg* Kohlen verbrennen sollen, und je 12 *g* Kohle zum Verbrennen 32 *g* Sauerstoff brauchen, der Sauerstoff nur $^1/_5$ der atmosphärischen Luft ausmacht, und die Luft mit 15 $^0/_0$ Überschuß vorhanden sein soll?

42. Wie groß ist der Luftdruck auf 1 *qcm* bei 723 *mm* Barometerstand? Sp. G. des Quecksilbers = 13,6.

43. Wie hoch kann der Luftdruck bei 630 *mm* Barometerstand das Wasser heben?

44. Wie viel Zentner Leuchtgas vom sp. G. 0,894 enthält ein Gasometer von 870 *cbm* Inhalt bei einem Druck von 716 *mm*?

45. Welches Volumen haben 32 *g* Wasserstoffgas bei einem Druck von 2 $^1/_4$ Atmosphären, wenn das sp. G. des Wasserstoffes = 0,0693 ist?

46. Welchen Druck würde Luft ausüben, wenn sie auf ein sp. G. von 0,027 verdichtet ist?

47. Ein Behälter von 12 *l* Größe, gefüllt mit Luft von 760 *mm* Druck, wird mit einem Behälter von 18 *l* Größe, gefüllt mit Luft von 520 *mm* Druck, in Verbinduug gesetzt. Welcher Druck stellt sich ein?

48. 10 *l* Luft von 720 *mm* Druck werden in einen Behälter von 30 *l* Größe, welcher schon Luft von 850 *mm* Druck enthält, hineingepreßt. Welcher Druck entsteht dadurch?

49. In einem Behälter von 10 *l* Rauminhalt, der schon Luft von 2 $^3/_4$ Atm. enthält, werden 4mal nach einander je 6 *l* gewöhnlicher Luft hineingepreßt. Welcher Druck ist schließlich vorhanden?

50. a Liter Luft vom Drucke p_1 und c Liter Luft vom Drucke p_2 werden in einen Raum von d Liter Inhalt gebracht. Welcher Druck herrscht dort?

51. In einen Raum von 15 *l* Größe, gefüllt mit Luft von 1 Atm. bringt man 4 *l* Kohlensäure auch von 1 Atm. Welcher Druck ist dann vorhanden und was wiegt 1 *l* der Mischung?

52. Bei einer Saugpumpe ist der Kolben 6 *m* über dem Wasserspiegel und noch 7,2 *m* von der Ausflußöffnung entfernt; sein Querschnitt beträgt 0,9 *qdm*. Welche Kraft hat man zum Aufziehen nötig und welche Arbeit leistet man pro 1″, wenn man

45 Züge in der Minute macht und die Hubhöhe 18 *cm* beträgt; beidesmal werden für innere Arbeit 15 % dazugerechnet. Wie viel Wasser fördert man in einer Stunde?

53. Bei einer Druckpumpe ist der Kolben 8 *m* über dem Wasserspiegel und das Steigrohr reicht noch 13 *m* in die Höhe. Der Kolben hat 1,4 *qdm* Querschnitt und 20 *cm* Hubhöhe. Welche Kraft hat man beim Hub, welche beim Druck nötig? Wie schwer muß man den Kolben durch Zusatzgewicht machen, damit beide Kräfte gleich werden. Welche Arbeit verrichtet man bei bei 25 Kolbenzügen pro Minute? Wie viel Wasser wird dadurch gefördert?

54. Ein Heronsball von 5 *l* Inhalt ist halb mit Wasser gefüllt. Man pumpt noch $3\frac{1}{2}$ *l* Luft hinein. Wie hoch wird dann das Wasser steigen und wie hoch schließlich, wenn der letzte Rest die Mündung verläßt?

55. Eine Feuerspritze schickt das Wasser 24 *m* hoch. Die Pumpenstiefel haben je $1\frac{1}{4}$ *qdm* Querschnitt und 2 *dm* Hubhöhe nnd sind an 45 *cm* langen Druckarmen angebracht, während die Spritzenleute an 135 *cm* langen Armen arbeiten. Wie groß ist die Arbeit der Männer pro 1″, wenn in einer Minute 70 Pumpenzüge erfolgen und $\frac{1}{3}$ durch Reibung verloren geht. Welcher Druck herrscht im Windkessel und wie groß ist der Effekt des gehobenen Wassers?

---

56. Um wie viel dehnt sich eine Stahlstange von 2,4 *m* Länge bei 37° Erwärmung aus?

57. Um wie viel zieht sich eine Kupferstange von 80 *cm* Länge bei 250° Abkühlung zusammen?

58. Wie lang wird ein Eisendraht von 25,6 *m* Länge bei 60° Erwärmung?

59. Ein Blechgefäß aus Messing faßt bei 0° 7,426 *l*; wie viel faßt es, wenn es um 50° oder um 100° erwärmt wird?

60. Ein Glasballon hat 480 *ccm* Inhalt bei 0°. Wie viel faßt er bei 100°?

61. Eine Thermometerkugel faßt bei 0° genau 1 *ccm*. Was wiegt das austretende Quecksilber, wenn man sie bis 100° erwärmt? Wie hoch steigt es in einer Röhre von 0,1 *qmm* Querschnitt?

62. Wie groß ist das sp. G. des Wassers bei 50°?

63. Was wiegen 7 *cbm* Luft von 23° R?

64. Welches Volumen nehmen 250 *l* Luft von 40° bei 0° ein?

65. Um wie viel dehnen sich 40 *cbm* Luft aus, wenn sie von 0° auf 180° erwärmt werden?

66. Welches Volumen bekommen v *cbm* Luft, wenn man sie von t_1^0 auf t_2^0 erwärmt?

67. Welches Volumen haben 6 *kg* Leuchtgas (sp. G. = 0,894) bei 18°?

68. Was wiegen 26 *l* Luft von 30° und 720 *mm* Druck?

69. Was wiegt 1 *cbm* Leuchtgas bei 12° und 71 *cm* Barometerstand?

70. Welches Volumen hat 1 Ztr. Kohlensäure bei —10° und 1 1/4 Atm. Druck?

71. Welches Volumen nimmt 1 *cbm* Luft von 26° und 754 *mm* Druck ein (Italien), wenn er auf —5° und 485 *mm* Druck (Alpen) kommt?

72. Welche Expansivkraft bekommen 80 *l* Luft von 10° und 73 *cm* Druck, wenn man sie auf 30 *l* von 100° bringt?

73. In einer Flasche von 3 3/4 *l* Inhalt, welche Kohlensäure von 20° und 71 *cm* Druck enthält, werden noch 15 *l* ebensolches Gas hineingepreßt. Welcher Druck besteht schließlich in der Flasche, wenn man sie auf 0° abkühlt? Wie viel *g* Kohlensäure sind nun darin und welches ist in diesem Zustand ihr sp. G.?

74. 2,6 *l* Gas wiegen bei 17° und 744 *mm* Barometerstand 4,785 *g*; wie groß ist dessen sp. G. bei 0° und 760 *mm*?

75. Welches Volumen nehmen v_1 *l* Luft von p_1 Druck und t_1 Temperatur an, wenn man sie auf 1 Druck und 0° Temperatur bringt?

76. Welchen Druck nehmen v_1 *l* Luft von p_1 Druck und t_1 Temperatur an, wenn man sie auf 1 *l* von 0° Temperatur bringt? Was ergibt sich aus dem Vergleich von 75 und 76?

---

77. Wie viel trockenes Holz müßte genügen, um 3 *hl* Wasser von 8° auf 100° zu erwärmen, wenn nur 20° Wärme verloren gingen?

78. Wenn zur Erwärmung von 60 *l* Wasser von 12° auf 80° 5 ℔ Steinkohlen verbraucht wurden, wie viel % Wärme wurden nutzbar gemacht?

79. Wie viel Wärme ist erforderlich, um 80 *cbm* Luft von 0° auf 20° zu erwärmen?

80. Wie viel Eis schmilzt, wenn man einen Eisenblock von 5 *kg* Gewicht und 560° Temperatur in Eis packt?

81. Welche Wärmemenge ist erforderlich, um 12 *kg* Eis von —10° zu schmelzen und auch noch auf 15° C zu erwärmen?

82. 140 *g* Holz wurden so verbrannt, daß die gesamte Verbrennungswärme zum Schmelzen von Eis verwandt wurde. Wenn nun dadurch 6,3 *kg* Eis geschmolzen wurden, wie groß ist die Verbrennungswärme von 1 *kg* Holz?

83. 270 *g* Blei von 85° haben 9 *g* Eis von 0° zum Schmelzen gebracht. Wie groß ist die spez. Wärme des Bleies?

84. Bei einem Verbrennungsversuch haben 2 *kg* Steinkohle gerade hingereicht, um 1,6 *kg* Wasser von 100° zu verdampfen. Wie viel Kalorien der Verbrennungswärme wurden hiebei pro 1 *kg* Steinkohle nutzbar gemacht, und wie viel % sind das, wenn 120 *g* derselben Kohle im stande sind 10,4 *kg* Eis zu schmelzen?

85. Ein Destillierapparat liefert pro Stunde 8 *l* Wasser von 60°. Mit wie viel Wasser von 10° ist das Kühlfaß in jeder Minute zu speisen, wenn es das Kühlfaß mit 40° verlassen soll?

---

86. Ein Dampfkesselventil von 10 *cm* Durchmesser soll sich bei einem Dampfdruck von 6 Atm. öffnen. Wie stark ist es zu belasten? Mit welchem Gewicht ist der lange Hebelarm zu belasten, wenn der kurze 9 mal kürzer ist?

87. Mit welchem Druck wird bei der Dampfmaschine Fig. 92 der Kolben niedergedrückt, wenn sein Durchmesser 86 *cm* und der innere Druck durch Abkühlen auf $^1/_3$ Atm. gebracht wird?

88. Bei einem Dampfhammer ist der Kolbendurchmesser 36 *cm*, der Durchmesser der Kolbenstange (Hammerstiel) ist 16 *cm*, die Dampfspannung ist 8 Atm. Wie schwer darf der Hammer sein?

89. Wenn eine Dampframme 40 Ztr. wiegt, wie groß muß der Durchmesser des Kolbens bei 5 Atm. Dampfspannung sein, und welcher Nutzeffekt wird erzielt, wenn die Ramme in der Minute 52 Hübe à 24 *cm* macht?

90. Wie viele Pferdekräfte leistet eine Dampfmaschine, welche bei 32 *cm* Kolbendurchmesser und 35 *cm* Hubhöhe in jeder Minute 64 Doppelhübe bei 6 Atm. Dampfspannung macht, wenn 10% für innere Arbeit abzurechnen sind?

91. Eine Zwillingsmaschine hat Kolben von 40 *cm* Durchmesser und 46 *cm* Hubhöhe und macht bei 2,4 Atm. Kesseldampfdruck und einer Kondensatorspannung von 12 *cm* Quecksilberhöhe in jedem Cylinder 54 Doppelhübe pro Minute. Welchen Nutzeffekt kann man von ihr erwarten, wenn 15% ihrer Leistung für innere Arbeit verbraucht werden?

92. Eine Lokomotive macht bei 28 *cm* Kolbendurchmesser und 32 *cm* Hubhöhe in jeder Minute 64 Turen. Welchen Effekt hat sie bei $8^1/_2$ Atm. Dampfspannung, wenn für innere Arbeit 8% abzuziehen sind?

93. Eine Dampfdreschmaschine arbeitet bei $5^1/_2$ Atm. Dampfdruck; von den zwei Cylindern hat jeder 11 *cm* Durchmesser und 14 *cm* Hubhöhe. Welchen Effekt hat sie bei 84 Turen pro Minute; wenn 10% für innere Arbeit abgerechnet werden. Wie viel Dampf verbraucht sie in der Stunde und wie groß ist dessen Wärmeinhalt? (Siehe Tabelle Seite 138).

94. Eine Wasserhaltungsmaschine arbeitet mit $7^1/_2$ Atm. Druck bei 40 *cm* Kolbendurchmesser und 45 *cm* Hubhöhe. Wie groß ist bei 52 Turen in der Minute die sekundliche Leistung der Maschine, und wie groß ist die Nutzleistung, wenn $8^0/_0$ für innere Arbeit abgerechnet werden müssen. Wie viel Wasser kann in der Stunde auf die Höhe von 24 *m* gehoben werden, wenn bei der Pumpe 12 $^0/_0$ der Arbeit verloren gehen?

95. Ein Kilogramm Steinkohle liefert 7000 Kalorien. Seine Wärme wird ohne Verlust dazu verwendet, um Wasser von 100^0 in Dampf von 1 Atm. zu verwandeln, wobei die latente Wärme des Wasserdampfes = 537 Kal. ist. Welche äußere Arbeit leistet der Dampf durch Überwindung des Luftdruckes, wenn 1 *kg* Wasser hiebei 1,696 *cbm* Dampf liefert? (Vergleiche Tabelle Seite 138.) Man vergleiche diese Arbeit mit dem mechanischen Äquivalent der aufgewandten 7000 Kalorien.

---

96. Welchen elektrischen Widerstand hat ein Draht von 5 *qmm* Querschnitt und 6,4 *km* Länge?

97. Wie groß ist der Widerstand einer Schwefelsäureschichte zwischen zwei Platten von 84 *cm* Länge und 62 *cm* Breite bei einem Abstand von 1,2 *cm*, wenn der sp. Widerstand 184000 ist?

98. Ein Element hat bei 0,30 *km* Widerstand eine Stromstärke von 3 Amp., bei 10 auß. W. aber nur $1^1/_4$ A. Wie groß ist seine elektromotorische Kraft und der innere Widerstand?

99. Welche Stromstärke erhält man, wenn man 4 galvanische Elemente von je 1,8 V hintereinander schaltet, wenn der innere Widerstand bei jedem 0,3 O und der äußere 2 O beträgt. Wie groß muß man den äußeren Widerstand nehmen, um eine Stromstärke von 3 A zu erhalten?

100. Wie viele Leclanche-Elemente von 1,5 V Spannung und 20 innerem Widerstand muß man hinter einander schalten, um bei einem äußeren Widerstand von 40 O eine Stromstärke von 0,2 A zu erhalten?

101. Welche Stromstärke erhält man, wenn man 3 Bunsenelemente von 1,8 V und 0,3 O parallel schaltet, bei einem äußeren Widerstand von 1 O?

---

102. Wie viel Amp. hat ein Strom, welcher in $2^1/_2$ Std. 116 *g* Wasser zersetzt? Wie viel *ccm* Wasserstoff entstehen dabei?

103. In einem Kupfervoltameter wurden in 10 Minuten 3,62 *g* Kupfer niedergeschlagen. Wie groß war die Stromstärke?

104. Welche Stromstärke ist im stande, in 24 Std. 5 Ztr. Kupfer auszuscheiden?

105. In welcher Zeit werden sich bei 2,6 O 10 *g* Silber ausscheiden, und wie viel Zink wird dabei im Element verbraucht?

106. Wie lange muß ein Negativ im galvanischen Bad sein, damit es sich bei 30 *cm* Länge und 18 *cm* Breite mit einer 0,8 *mm* dicken Kupferschichte überzogen hat, wenn die Stromstärke 12 O beträgt?

107. Eine Dynamomaschine gibt einen Strom von 60 O à 80 V. Wie viel Pferdestärken beansprucht sie, wenn $8^0/_0$ für innere Arbeit verloren gehen?

108. Wie viel Amp. à 88 V kann eine Dynamomaschine liefern, wenn sie 12 Pferdestärken verbraucht und $12^0/_0$ verloren gehen?

---

109. Bei einem Photometer von Rumford ist eine deutsche Vereinskerze 64 *cm*, eine Petroleumlampe 1,53 *m* vom Schirm entfernt, so daß die Schatten gleich dunkel erscheinen. Wie viele absolute Lichteinheiten beträgt die Leuchtkraft dieser Lampe?

110. Wenn man unter 1 Meterkerze diejenige Beleuchtung versteht, welche ein kleines Flächenstück (*qcm*) von einer Normalkerze in 1 *m* Abstand bei senkrechter Bestrahlung erhält, wie stark ist dann im vorigen Beispiel die Beleuchtung des Schirmes durch die Lampe allein?

111. In welcher Entfernung beleuchten 3 Argandbrenner à 22 N.K. eine Wand ebenso stark als eine Vereinskerze in $^1/_2$ *m* Entfernung? Wie viel Meterkerzen hat die Beleuchtung?

---

112. Unter welchem Gesichtswinkel sieht man einen 1,2 *m* hohen Gegenstand in 15 *m* Entfernung?

113. Unter welchem Gesichtswinkel sieht man sich selbst, wenn man 4 *m* vor einem Spiegel steht, bei 1,7 *m* Größe? Wie groß muß der Spiegel sein, um die ganze Figur zu zeigen?

114. Dreht man einen Spiegel um den Winkel α, so dreht sich jeder von ihm reflektierte Strahl um den Winkel 2 α. Beweis?

115. Wenn man 3,6 m vor einem Spiegel steht, unter welchem Gesichtswinkel sieht man dann das Spiegelbild eines 60 *cm* großen Gegenstandes, der 2 *m* (10 *m*) vor dem Spiegel steht?

116. Bei einem Winkelspiegel von 45° ist ein Strahl nach zweimaliger Brechung senkrecht zu seiner ursprünglichen Richtung, gleichgültig, welches sein Einfallswinkel war. Warum?

---

117. Vor einem Hohlspiegel von 80 *cm* Brennweite befindet sich in 12 *m* Entfernung ein Gegenstand von 1,4 *m* Höhe. Wo liegt das Bild und wie groß ist es?

118. Vor einem Hohlspiegel von 2 *m* Krümmungsradius befindet sich in 40 *cm* Abstand ein Gegenstand. Wo liegt das Bild?

119. Vor einem Konvexspiegel von 20 *cm* Radius befindet sich ein 5 *cm* hoher Gegenstand in 50 *cm* Entfernung. Wo liegt das Bild, wie groß ist es, und wie groß erscheint es vom Gegenstand aus betrachtet?

---

120. Ein Lichtstrahl fällt unter $i = 56^0$ auf Wasser (Olivenöl); unter welchem Winkel wird es gebrochen?

121. Wenn Licht unter 32^0 die Wasserfläche von unten trifft, unter welchem Winkel tritt es in Luft aus?

122. Kann Licht, das von außen her in das Innere eines kugelförmigen Wassertropfens eingedrungen ist, im Innern des Tropfens total reflektiert werden?

123. Auf eine Prisma mit dem brechenden Winkel $\alpha = 33^0$ fällt ein Lichtstrahl unter $i = 53^0$. Unter welchem Winkel verläßt er das Prisma und um welchen Winkel wird er im ganzen abgelenkt, wenn $n = 1,6$ ist? Wie stellt sich die Lösung für $i = 20^0$ oder für $\alpha = 42^0$.

124. Auf ein Prisma vom brechenden Winkel $\alpha = 10^0$ fällt in einer zu brechenden Kante senkrechten Ebene ein Lichtstrahl unter $i = 17^0$, jedoch von der Seite her, auf welcher die brechende Kante liegt. Unter welchem Winkel verläßt er das Prisma, und wie groß ist die Ablenkung wenn $n = 1,592$ ist? Wie stellt sich die Lösung für $i = 30^0$ oder für $\alpha = 20^0$?

125. Unter welchem Winkel müßte das Licht nach den Bedingungen der Aufgabe 124 einfallen, damit es die zweite Prismenfläche gerade im Grenzwinkel trifft?

126. Ein Glasprisma hat als Querschnitt ein gleichschenkliges Dreieck mit dem Winkel $\alpha = 120^0$ an der Spitze. In der Ebene dieses Dreieckes fällt ein Lichtstrahl parallel der Basis auf die eine Seite. Welchen Weg macht der Lichtstrahl $(n = 1,5)$?

127. Wie stellt sich die Lösung von 126, wenn der Lichtstrahl die erste Seitenfläche unter einem Einfallswinkel von 50^0 trifft?

128. Ein Lichtstrahl trifft senkrecht auf die eine Fläche eines Prismas von $\alpha = 20^0 37'$; unter welchem Winkel verläßt es die zweite Fläche?

---

129. 5,4 *m* vor einer positiven Linse von 90 *cm* Brennweite befindet sich ein leuchtender Gegenstand von 37 *cm* Durchmesser. Wo erscheint das Bild, welcher Art und wie groß ist es?

130. Vor einer positiven Linse von 30 *cm* Brennweite befinden sich zwei leuchtende Punkte in 2,4 *m* bezw. 2,5 *m* Entfernung. Wie weit stehen ihre Bilder von einander ab?

131. 120 *cm* vor einer positiven Linse steht eine Kerzenflamme; 40 *cm* hinter der Linse entsteht das reelle Bild der Flamme. Wie läßt sich hieraus die Brennweite der Linse berechnen?

132. Wenn zwei Sterne einen scheinbaren Abstand von 2′38″ haben, wie weit sind dann ihre Bilder von einander entfernt, welche durch eine positive Linse von 3,8 *m* Brennweite erzeugt werden. Unter welchem Gesichtswinkel erscheint dieses Bildpaar aus der deutlichen Sehweite von 18 *cm* betrachtet?

133. Berechne Art, Lage und Größe des Bildes aus folgenden Angaben, wobei G die Größe des Gegenstandes bedeutet?

a) f = 1,4 *m* a = 3,5 *m*, G = 20 *cm*;
b) f = 0,6 *cm* a = 4 *mm*, G = 0,3 *mm*;
c) f = 3 *cm*, a = 5 *cm*, G = 1,4 *cm*;
d) f = 30 *cm*, a = 2 *m*, G = 2,4 *cm*;
e) f = 10 *cm*, a = 6 *cm*, G = 0,20 *cm*;
f) f = 10 *cm*, a = 12 *cm*, G = 0,2 *cm*.

---

134. Wie weit muß bei einer Lupe von 3 *cm* Brennweite der Gegenstand vor die Linse gehalten werden, damit sein virtuelles Bild in der deutlichen Sehweite von 20 *cm* erscheint?

135. Wie weit muß bei einer Lupe von 3 *cm* Brennweite der Gegenstand vor die Linse gehalten werden, damit sein virtuelles Bild in der deutlichen Sehweite von 18 *cm* erscheint? Wie vielmal ist es größer, wie vielmal erscheint es dem Auge vergrößert?

136. Welche Brennweite muß eine Lupe haben, damit das in der deutlichen Sehweite (20 *cm*) erscheinende Bild viermal vergrößert erscheint?

137. Welche Brennweite hat das Objektiv einer Camera obscura, wenn das Bild eines 2,4 *m* entfernten Gegenstandes achtmal verkleinert erscheint?

138. Die Linse eines Photographenapparates hat 20 *cm* Brennweite. Wo muß man das Objekt aufstellen, damit das Bild viermal verkleinert erscheint?

139. Welche Brennweite muß die Linse eines Projektionsapparates haben, damit man auf einer 6 *m* entfernten Wand 10fach vergrößerte Bilder erhält?

140. Zwei positive Linsen von gleicher Brennweite stehen unmittelbar hintereinander. Wie kann man ersehen, daß die Brennweite dieses Systems gleich der Hälfte der Brennweite einer Linse ist?

141. Bei einem astronomischen Fernrohr ist die Brennweite des Objektives = 90 *cm*, die des Okulars 4 *cm*, das Objekt ist 300 *m* entfernt und 8 *m* hoch. Wie weit müssen die Linsen von

einander entfernt sein, damit das Bild in der deutlichen Sehweite von 20 *cm* erscheint, und wie stark ist dann die Vergrößerung?

142. Bei einem Operngucker ist die Brennweite des Objektives = 15 *cm*, die des Okulars = — 4 *cm*. Wie weit müssen beide von einander entfernt sein, wenn das Bild eines 6 *m* entfernten Gegenstandes in der deutlichen Sehweite von 18 *cm* erscheinen soll?

143. Bei einem Mikroskop ist die Brennweite des Objektives = 2 *mm*, die des Okulares = 1,4 *cm*; der Abstand beider Linsen beträgt 12 *cm*. Wie weit muß das Objekt von der Objektivlinse entfernt sein, damit das Bild in der deutlichen Sehweite von 20 *cm* erscheint, und wievielmal erscheint es vergrößert?

---

144. Wenn an einem Hebel auf der einen Seite in den Entfernungen von 18 *cm* und 33 *cm* vom Stützpunkte die Kräfte 9 und 11 *kg* und auf der andern Seite die Kraft 15 *kg* in 20 *cm* Entfernung wirkt, wo muß noch die Kraft von 10 *kg* dazugefügt werden, damit Gleichgewicht stattfindet?

145. An einer horizontalen Stange von 64 *cm* Länge, die an einem Ende in einem Scharnier drehbar ist, hängt am andern Ende eine Last von 20 *kg*. Mit welcher Kraft drückt sie auf einen Punkt, der 15 *cm* vom Scharnier entfernt ist, und mit welcher Kraft drückt sie auf das Scharnier selbst?

146. An den Enden einer Stange von $a = 80$ *cm* Länge wirken die Parallelkräfte $P = 56$ *kg* und $Q = 72$ *kg*. Wo ist die Stange zu stützen?

147. Eine Stange von der Länge l ist an beiden Endpunkten gestützt. Wenn sie nun in der Entfernung a vom einen Ende mit Q *kg* belastet ist, wie verteilt sich diese Last auf die beiden Stützen. Wo muß die Last angebracht werden, damit sich die Belastungen wie 2 : 3, wie $p : q$, verhalten?

148. Eine Last von 100 *kg* soll auf eine horizontale, an beiden Enden gestützte Stange von 1,5 *m* Länge so gelegt werden, daß der eine Stützpunkt nur einen Druck von 20 *kg* erfährt. Wo ist die Last anzubringen?

149. Ein Balken hat bei 5,2 *m* Länge 128 ℔ Gewicht, die in seiner Mitte angreifen, ist an beiden Enden fest aufgelegt und 2,4 *m* vom einen Ende noch mit 280 ℔ belastet. Welchen Druck übt er auf jede Stütze aus?

150. An einem Balken von der Länge l, der an beiden Enden gestützt ist, wirken in den Abständen a_1, a_2, a_3, a_4 je vom linken Endpunkt aus gerechnet die Gewichte P_1, P_2, P_3, P_4. Welchen Druck hat jede Stütze auszuhalten?

151. An einem Hebel wirken folgende Kräfte: Am einen

Ende 50 *kg*, 20 *cm* davon entfernt 60 *kg*, weitere 15 *cm* davon 125 *kg*, weitere 30 *cm* davon 4 *kg*, und weitere 16 *cm* davon 80 *kg*. Wo muß der Hebel gestützt werden, wenn alle Kräfte in derselben Richtung wirken, und wo, wenn die 2. und 4. Kraft nach entgegengesetzten Richtungen wirken?

152. An einer Stange wirken folgende Parallelkräfte: am einen Ende 40 *kg*, 12 *cm* davon 70 *kg*, weitere 20 *cm* davon 50 *kg* nach aufwärts, weitere 23 *cm* davon 60 *kg* nach abwärts und weitere 23 *cm* davon 35 *kg* nach abwärts. Wo und wie stark muß sie gestützt werden?

153. Ein Balken von 4,8 *m* Länge ist an beiden Enden unterstützt. Er ist in mehreren Punkten belastet, und zwar 0,6 *m*, 1,4 *m*, 2,2 *m*, 3 *m* je vom linken Endpunkt mit 120 *kg*, 250 *kg*, 75 *kg*, 140 *kg*. An welchem Punkte dürfen diese Belastungen vereinigt werden, wenn der Druck auf die Stützen sich nicht ändern soll?

154. Ein an beiden Enden unterstützter Balken von 3,6 *m* Länge ist 1,2 *m* vom linken Ende schon mit 100 *kg* belastet. Wo muß eine weitere Last von 150 *kg* angebracht werden, damit die Belastungen der beiden Stützen gleich werden?

155. Ein horizontaler Balken AB ruht in A in der Wand; in B ist eine unter 30^0 geneigte Zugstange BC angebracht, welche in C in der Mauer befestigt ist. Welchen Zug hat die Zugstange auszuhalten, wenn der Balken 2,8 *m* lang, 70 *kg* schwer und 1 m von B entfernt noch mit 240 *kg* belastet ist?

156. Ein horizontaler Balken AB ist in A mit der Mauer verklammert, und in B durch eine unter 15^0 geneigte Stütze BC gegen die Mauer in C gestützt. Welchen Druck hat die Stütze auszuhalten, wenn AB 3 *m* lang, 120 *kg* schwer, in B mit 100 *kg* und 1 *m* vor B noch mit 150 *kg* belastet ist?

---

157. Zeichne ein beliebiges Fünfeck (Sechseck) und bestimme dessen Schwerpunkt ähnlich wie in Figur 303 Seite 398.

158. Auf die Seite eines rechtwinkeligen Dreiecks von den Katheten 6 und 8 *cm* (5 und 9 *cm*) sind nach außen gerichtete Rechtecke von je 5 *cm* Höhe aufgesetzt. Berechne den Schwerpunkt der ganzen Figur,

159. Von einem Trapez sind gegeben die beiden Parallelen a und b und ihr Abstand h. Zeige, daß der Schwerpunkt von a aus den Abstand $x = \frac{h}{3} \cdot \frac{a + 2b}{a + b}$, von b aus $y = \frac{h}{3} \cdot \frac{b + 2a}{b + a}$ hat.

160. An ein Rechteck von den Seiten 7 *cm* und 30 *cm* sind an die langen Seiten als Grundlinien gleichschenklige Dreiecke

von 42 *cm* und 12 *cm* Höhe angesetzt. Berechne die Lage des Schwerpunktes.

161. Suche den Schwerpunkt einer beliebigen krummlinig begrenzten Figur durch Zerlegung derselben in sehr schmale Parallelstreifen.

---

162. Bei einem dreifach zusammengesetzten Hebel gibt der erste Hebel einen 5fachen, der zweite einen 6fachen, der dritte einen $2^1/_2$fachen Kraftgewinn. Welche Last kann durch eine Kraft von 12 *kg* gehoben werden?

163. Bei einer Aufzugswinde hat der Durchmesser der Seiltrommel 32 *cm*, das Zahnrad hat 90 Zähne, der Trieb 8 Zähne und die Kurbel hat eine Länge von 46 *cm*. Wie groß ist der Kraftgewinn? Welche Kraft braucht man, um eine Last von $4^1/_4$ Ztr. zu heben, wenn für Reibung $^1/_5$ dazu zu rechnen ist? Welche Arbeit leistet man, wenn man die Last 12 *m* hoch hebt, und oft ist hiezu die Kurbel zu drehen?

164. Wie viel Ziegelsteine à $1^7/_8$ *kg* Gewicht kann ein Pferd mittels eines Flaschenzuges von je 3 Rollen auf einmal emporziehen, wenn seine Zugkraft 60 *kg* beträgt und $^1/_4$ für Reibung verloren geht?

165. An einem Krahnen drehen 4 Männer mit je 12 *kg* Kraft an Kurbeln von 42 *cm* Länge; die zwei Triebe haben 8 bezw. 12 Zähne, die zwei Zahnräder haben 144 bezw. 150 Zähne; die Seiltrommel hat 35 *cm* Durchmesser; die Last hängt zudem an einer losen Rolle und für Reibung geht etwa $^1/_6$ verloren. Wie groß darf die Last sein?

---

166. An einer Wage von 360 *g* Gesamtgewicht bringt ein Übergewicht von 2 Centigramm einen Ausschlag von 8^0 hervor. Wie weit ist der Schwerpunkt vom Stützpunkt entfernt? Wenn dieselbe Wage außerdem beiderseits mit 500 *g* belastet wird, welches Übergewicht bringt dann einen Ausschlag von 10^0 hervor?

167. Eine Schnellwage, deren Lastarm = 8 *cm* ist, ist unbelastet nur dann im Gleichgewicht, wenn das Laufgewicht von 1 ℔ an einem Arm von 14 *cm* hängt; dort ist also 0 eingraviert. Wo muß das Laufgewicht hingehängt werden, wenn 1 ℔, 2 ℔, 3 ℔ u. s. w. als Last eingelegt sind? Gesetz?

---

168. Gegeben $P_1 = 17$ *kg*, unter 45^0 $P_2 = 22$ *kg*, unter 30^0 $P_3 = 11$ *kg*, unter 75^0 $P_4 = 10$ *kg*. Bestimme die Resultierende dieser in einem Punkte angreifenden Kräfte durch Zeichnung!

169. Gegeben $P_1 = 16$, unter 90^0 $P_2 = 17$; unter 45^0 $P_3 = 15$, unter 120^0 $P_4 = 21$. Unter welchem Winkel muß man $P_5 = 40$ *kg* dazu fügen, damit die Richtung der Resultierenden gerade entgegengesetzt P_1 ist?

170. Welche Kraft braucht man, um eine Last von 510 *kg* auf einer schiefen Ebene zu halten, welche bei 10 *m* Länge um 115 *cm* steigt? Wie groß muß diese Kraft sein, wenn sie parallel der Basis wirkt, oder wenn sie unter 20^0 nach aufwärts (oder nach abwärts) gerichtet ist?

171. Welche Kraft parallel der schiefen Ebene braucht man, um einen Körper von 160 *kg* Gewicht auf einer schiefen Ebene von 34^0 Neigung zu halten, wenn die Reibung $^1/_8$ beträgt? Welche Arbeit leistet man, wenn man ihn 260 *m* längs der schiefen Ebene nach aufwärts bringt?

172. Eine Kugel von k *kg* Gewicht liegt auf einer schiefen Ebene von α^0 Neigung und lehnt sich dabei an ein Brett, welches am Fuße der schiefen Ebene in vertikaler Richtung aufgestellt ist. Welchen Druck übt die Kugel auf die schiefe Ebene und welchen auf das Brett aus?

173. Eine Last von 145 *kg* liegt auf einer schiefen Ebene von 20^0 Neigung und wird gehalten durch einen Strick, der unter 45^0 nach abwärts geneigt ist. Welche Kraft muß längs des Strickes wirken und wie stark drückt die Last auf die schiefe Ebene?

174. Welche Kraft ist erforderlich und welche Arbeit wird geleistet, wenn ein Wagen von 27 Ztr. Gewicht auf einer Straße von $5^1/_2{}^0/_0$ Steigung und $^1/_8$ Reibung 265 *m* weit nach aufwärts (nach abwärts) gefahren wird?

175. Ein Steinblock von 15 Ztr. Gewicht soll über eine schiefe Ebene von 20^0 Steigung heraufgeschleift werden. Er wird an einem Seil befestigt, welches parallel der schiefen Ebene läuft und sich an der Seiltrommel eines Haspels aufwickelt. Der Durchmesser der Seiltrommel ist 28 *cm*, die Kurbellänge 54 *cm*. Mit welcher Kraft wird das Seil gespannt, wenn der Stein auf der schiefen Ebene eine Reibung hat, die $^1/_3$ des Druckes beträgt, und welche Kraft muß an der Kurbel wirken, um den Stein heraufzuschleifen, wenn im Haspel noch $10^0/_0$ durch Reibung verloren gehen?

176. Welchen Druck übt ein Schraubenspindel von 8 *mm* Ganghöhe aus, wenn man an einem Schlüssel von 40 *cm* Länge eine Kraft von 25 *kg* wirkt?

177. Wie lange muß man den Schlüssel einer Schraube von 13 *mm* Ganghöhe wählen, damit eine Kraft von 15 *kg* einen Druck von 50 Ztr. hervorbringt?

178. Eine Schraubenspindel von 18 *mm* Ganghöhe soll gehoben werden durch Umdrehung der Mutter; die Mutter hat am Rande 60 Zähne, in welche ein Trieb von 8 Zähnen eingreift;

dieser wird durch eine Kurbel von je 32 *cm* Radius gedreht, an welcher zwei Männer mit je 15 *kg* Kraft angreifen. Welche Last darf an der Spindel hängen, wenn $^1/_3$ durch Reibung verloren geht?

---

179. Welche Geschwindigkeit hat ein Körper, der in 1 Std. 37 Min. 28,6 *km* zurücklegt?

180. Welchen Weg legt ein Dampfer bei 11 Knoten Geschwindigkeit in 3 Tg. 6 Std. zurück? (Ein Knoten = $^1/_{60}$ engl. Seemeilen in 1 Min.)

181. Wie lange braucht ein Körper, um eine Höhe von 68 *m* (274 *m*) zu durchfallen, und welche Endgeschwindigkeit erlangt er?

182. Mit welcher Endgeschwindigkeit kommt das Wasser am Fuße eines 23 *m* hohen Wasserfalles oder einer 2,4 *m* hohen Schleuse an?

183. Von welcher Höhe muß ein Körper herunterfallen, um eine Endgeschwindigkeit von 1 *m* (30 *m*, 50 *m*) zu erlangen?

---

184. Wie lange braucht ein Körper, um eine schiefe Ebene von 84 *m* (200 *m*) Länge und von 16^0 ($22^1/_2{}^0$) Steigung zu durchlaufen, und welche Endgeschwindigkeit erlangt er dabei?

185. Wie hoch muß eine schiefe Ebene von α^0 (25^0) Steigung sein, damit ein Körper mit der Endgeschwindigkeit v = 16 *m* unten ankommt?

186. Um eine Rinne von 30 *m* Länge zu durchlaufen, braucht das Wasser 5''; wie groß ist deren Steigung, und mit welcher Geschwindigkeit kommt das Wasser unten an?

187. Wie hoch fliegt eine Kanonenkugel, welche mit 440 *m* Anfangsgeschwindigkeit aufwärts geworfen wird, und mit welcher Geschwindigkeit müßte sie abgeschossen werden, um die Höhe des Montblank (= 4810 *m*) oder die des Gaurisankar (= 8840 *m*) zu erreichen?

188. Ein Körper fällt frei herab. Am Schlusse der 3. Sekunde wird ihm ein anderer Körper nachgeworfen, welcher am Ende der 5. Sek. von ihm einen Abstand 40 *m* hat. Wann treffen beide Körper zusammen?

189. Ein Körper wird mit 156,8 *m* Anfangsgeschwindigkeit senkrecht aufwärts geworfen. 18 Sek. später wird ihm ein zweiter mit 186,2 *m* Anfangsgeschwindigkeit nachgeworfen. Wann und wo treffen sie sich? Wenn sie nach dem Zusammentreffen wie beim zentralen Stoße mit vertauschten Geschwindigkeiten von einander zurückprallen, wann kommt dann jeder wieder auf den Boden? (g = 9,8 *m*).

190. Ein lotrecht in die Höhe geworfener Körper hat eine Höhe a = 80,35 *m* mit einer Geschwindigkeit b = 1,68 *m* erreicht. Mit welcher Geschwindigkeit ist er ausgegangen und welche Zeit hat er gebraucht, um bis zu jener Höhe zu gelangen (g = 9,81 *m*)?

191. Ein Körper wird senkrecht in die Höhe geworfen mit 75 *m* Anfangsgeschwindigkeit. Mit welcher Anfangsgeschwindigkeit muß ihm 4″ später ein zweiter folgen, wenn er den ersten in dessen höchstem Punkte (in seinem eigenen h. P.) erreichen soll?

192. Wie hoch wird ein Körper gestiegen sein, der nach 12″ (15″, 40″) wieder zur Erde kommt? Wie groß war seine Anfangsgeschwindigkeit?

193. Wie tief muß eine Ausflußöffnung von 1,4 *qcm* Querschnitt unter dem Wasserniveau liegen, wenn sie in der Minute 80 *l* Wasser liefern soll? und welchen Querschnitt muß sie haben, um bei halber Tiefe die nämliche Wassermenge zu liefern?

194. Zwei große Wasserbehälter sind unten durch eine Röhre verbunden. Mit welcher Geschwindigkeit bewegt sich in ihr das Wasser, wenn eine Niveaudifferenz von 38 *cm* vorhanden ist?

195. Mit welcher Geschwindigkeit fließt Wasser aus einem Windkessel, wenn in diesem die Luft einen Überdruck von 26 *cm* Quecksilberhöhe hat?

196. Mit welcher Geschwindigkeit strömt Luft von 2 Atm. Druck in Luft von 1 Atm. Druck?

197. Mit welcher Geschwindigkeit strömt Luft von 758,4 *mm* Quecksilberdruck in Luft von 752,4 *mm* Druck?

198. Mit welcher Geschwindigkeit strömt Luft aus einem Behälter, in welchem es 8 *cm* Wasserhöhe Überdruck hat in die freie Luft aus, wenn der Barometerstand 760 *m* (742 *mm*, 718 *m*) ist?

199. Mit welcher Geschwindigkeit strömt unter den Bedingungen von Aufgabe 198 Leuchtgas (sp. G. = 0,87) Kohlensäure (sp. G. = 2,4) aus?

---

200. Wasser schießt unter einer Schleuse von 1,4 *m* Stauhöhe heraus in eine Rinne von 12 *m* Länge und 16° Neigung. Welche Endgeschwindigkeit erlangt es?

201. Wie hoch kommt ein Körper auf einer schiefen Ebene von 15° bei 8 *m* Anfangsgeschwindigkeit?

202. Von einem Turme fällt ein Körper in 4″ frei herab, während er auf der schiefen Ebene in 10″ ohne Reibung vom Turme aus heruntergleiten würde. Wie hoch ist der Turm, wie lang die schiefe Ebene, wie groß ihre Neigung, und wie groß die Endgeschwindigkeit des Körpers?

203. Auf einer l = 1500 *m* langen um α = 12° geneigten Ebene bewegen sich zwei Körper, der eine vom untern Ende nach

aufwärts mit einer Anfangsgeschwindigkeit c = 60 *m*, der andere gleichzeitig ohne Anfangsgeschwindigkeit von oben nach abwärts. Wo und mit welchen Geschwindigkeiten treffen sie sich?

204. Zwei Körper werden auf zwei schiefen Ebenen von den Neigungen α_1 und α_2 mit derselben Anfangsgeschwindigkeit nach aufwärts geworfen. Wie verhalten sich die auf beiden zurückgelegten Wege bis dorthin, wo die Körper zur Ruhe kommen?

205. Ein Körper rollt über eine schiefe Ebene von 12 *m* Höhe und $22^1/_2{}^0$ Neigung, kommt dann auf eine horizontale Ebene, auf welcher er die horizontale Komponente seiner Geschwindigkeit beibehält; nach wie viel Sekunden erreicht er das Ende der 100 *m* langen horizontalen Bahn?

---

206. In welcher Entfernung vom Fuße eines 120 *m* hohen Turmes fällt ein Stein zu Boden, der mit 16 *m* Geschwindigkeit horizontal geschleudert wird, und unter welchem Winkel fällt er auf?

207. Mit welcher Geschwindigkeit muß ein Körper horizontal geschleudert werden, damit er gerade den Fuß eines 216 *m* hohen Berges von 39^0 Neigung trifft?

208. Mit einer Flinte, deren Kugel eine Anfangsgeschwindigkeit von 400 *m* bekommt, schieße ich auf einen 500 *m* entfernten, in gleicher Höhe befindlichen Punkt; um wie viel Grad muß ich die Flinte erheben (um wie viel Meter muß ich das Ziel höher annehmen) um das Ziel zu treffen?

209. Wie groß ist die Anfangsgeschwindigkeit eines horizontal geworfenen Körpers, der sich auf die Länge von 160 *m* um 12 *m* senkt?

210. Welche Wurfweite und Wurfhöhe erreicht ein Körper, der mit 52 *m* Anfangsgeschwindigkeit unter 33^0 geworfen wird, und welche Zeit braucht er dazu?

211. Mit welcher Anfangsgeschwindigkeit muß ein Körper unter 28^0 geworfen werden, damit er eine Steighöhe von 68 *m* erreicht, und welche Wurfweite erreicht er dann?

212. Unter welchem Winkel muß ein Körper geworfen werden, damit er bei 144 *m* Anfangsgeschwindigkeit eine Steighöhe von 250 *m* erreiche, und welche Wurfweite erreicht er?

213. Unter welchem Winkel muß ein Körper geworfen werden, um bei einer Anfangsgeschwindigkeit von 280 *m* eine Wurfweite von 2000 *m* zu erreichen?

214. Unter welchem Winkel muß ein Geschoß von a *m* (50, 77, 80 *m*) Anfangsgeschwindigkeit abgeschossen werden, um eine Scheibe zu treffen, die in c *m* (120, 290, 400 *m*) horizontaler Entfernung h *m* (15, 36, 45 *m*) vertikal über dem Boden steht?

215. Wo und unter welchem Winkel trifft eine unter 45^0

abgeschossene Kugel von 120 *m* (250 *m*) Anfangsgeschwindigkeit ein Plateau von 150 *m* (180 *m*) Höhe?

216. Ein Körper erreicht eine Wurfhöhe von 120 *m* (32, 540 *m*) und eine Wurfweite von 400 *m* (850, 65 *m*); mit welcher Geschwindigkeit und Elevation wurde er geworfen?

217. Unter welchem Winkel muß ein Körper geworfen werden, damit seine Wurfweite ebensogroß (3 mal, $^2/_3$ mal, 10 mal so groß) ist als seine Wurfhöhe?

218. Ein Körper rollt über ein Dach von l (8 *m*) Länge und α^0 (36^0) Neigung und durchfällt dann die Luft; in welcher horizontalen Entfernung vom Fuße des Hauses erreicht er den Boden, wenn die Höhe des Hauses bis zum Dache b (12 *m*) ist? Mit welcher horizontalen Geschwindigkeit muß derselbe Körper geschleudert werden, wenn er gerade an der Dachkante vorbei kommen soll, und wo erreicht er dann das Pflaster?

219. Eine Feuerspritze sendet einmal unter $\alpha = 30^0$ (40^0), ein andermal unter $\beta = 52^0$ (50^0) ihren Strahl schräg nach oben. In welchem Verhältnis stehen die Sprunghöhen der Wasserstrahlen, in welchem die Sprungweiten?

220. Mit welcher Anfangsgeschwindigkeit muß eine Kugel abgeschossen werden, um bei einem gegebenen Elevationswinkel $\alpha = 5^0$ ein Ziel zu treffen, dessen horizontale Entfernung a = 1632 *m* beträgt, und welches um den Depressionswinkel $\beta = 10^0$ tiefer liegt als der Ausgangspunkt? Welches ist der höchste Punkt der Flugbahn?

221. Durch ein Geschoß von 600 *m* Anfangsgeschwindigkeit und der Elevation $\alpha = 30^0$ wurde eine 100 *m* über dem Horizonte liegende Turmspitze getroffen. Wie weit ist der Turm horizontal vom Geschütz entfernt und mit welcher Geschwindigkeit wurde er getroffen?

---

222. Bei der Atwood'schen Fallmaschine sind die Gewichte 36 *g* und 39 *g*. Wie groß ist die Beschleunigung und wie lange dauert die Bewegung bei 1,80 *m* Fallhöhe?

223. Welche Geschwindigkeit bekommt eine frei bewegliche Masse von 320 *kg*, wenn auf sie 40″ lang eine konstante Kraft von 6 *kg* wirkt. Wie weit läuft sie dabei, und wie weit läuft sie dann noch, wenn sich ihr dann ein Widerstand in den Weg stellt, zu dessen Überwindung sie eine Kraft von 10 *kg* anwenden muß?

224. Auf eine frei bewegliche Masse von 280 *kg* Gewicht und 2 *m* Geschwindigkeit wirkt in der Richtung ihrer Geschwindigkeit eine Kraft von 8 *kg* beschleunigend. Wie lange braucht sie um einen Weg von 1000 *m* zurückzulegen, und welche Endgeschwindigkeit hat sie dann?

---

225. Ein mit einer Geschwindigkeit von 9 *m* laufender Eisenbahnzug läuft ungebremst noch 1200 *m*, gebremst noch 150 *m* weit; wie lange braucht er in jedem Falle dazu, und wie groß ist die Verzögerung?

226. Eine Flintenkugel von 450 *m* Geschwindigkeit und 25 *g* Gewicht dringt in Holz 33 *cm* tief ein; welchen Widerstand leistet dabei das Holz?

227. Ein Körper läuft über eine schiefe Ebene von 17° Neigung und 88 *m* Länge. Welche Geschwindigkeit hat er am Ende, wenn die Reibung 7% vom Drucke beträgt? Mit welcher Geschwindigkeit muß er von unten aus nach aufwärts bewegt werden, wenn er bis oben kommen soll?

228. Ein Körper wird über eine schiefe Ebene von 12° Neigung aufwärts geworfen mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 15 *m*; die Reibung beträgt 4% vom Druck. Wie hoch kommt er und mit welcher Geschwindigkeit kommt er wieder unten an?

229. Ein Körper legt mit der Anfangsgeschwindigkeit $c = 40$ *m* auf einer schiefen Ebene, deren Neigung $\alpha = 10^0$ ist, bis zum Stillstand 38 *m* zurück. Wie groß ist der Reibungskoeffizient?

230. Ein Eisenbahnzug von $P = 15\,0000$ *kg* soll auf wagrechter Strecke von der Haltestelle aus in $t = 40''$ in die Geschwindigkeit $c = 8$ *m* versetzt werden; der Reibungskoeffizient ist $\varrho = \frac{1}{200}$. Welchen Weg legt der Zug in den 40″ zurück? Wie groß ist die Kraft der Maschine und die in den 40″ zu leistende Gesamtarbeit? Wieviel Pferdekräfte sind dazu erforderlich?

231. Ein Körper hat 9 *m* Anfangsgeschwindigkeit und erleidet eine gleichförmige Verzögerung von 0,2 *m*. Wie lange braucht er bis die Geschwindigkeit sich auf 3 *m* reduziert hat? Welchen Weg hat er dabei zurückgelegt und welche Arbeit geleistet, wenn er 80 *kg* wiegt?

---

232. Ein Körper von 50 *kg* Gewicht bewegt sich mit der Geschwindigkeit von 6 *m* im Kreise von 10 *m* Radius. Welche Zentrifugalkraft bringt er hervor und wie groß ist die Zentralbeschleunigung?

233. Welche Zentrifugalkraft bringt die Masse von 7,2 *kg* hervor, wenn sie den Kreis von 10 *m* Radius in 8 Sekunden durchläuft?

234. Wie schnell muß ein Körper sich auf einem vertikalen Kreise mit dem Radius $r = 0{,}8$, 1,4 *m* bewegen wenn die Schwerkraft durch die Zentrifugalkraft aufgehoben werden soll?

235. Mit welcher Umlaufszeit muß sich die Masse von 12 *kg* im Kreise von 6 *m* Radius bewegen, um 2 *kg* Kraft hervorzubringen?

236. Wie groß ist die Zentrifugalbeschleunigung am Rande eines rotierenden Zubers von 110 *cm* Durchmesser bei 340 Touren in der Minute (Syrupschleuder)?

237. Wie groß ist die Zentrifugalkraft und die Zentrifugalbeschleunigung bei einem Waggon von 250 Zentner Gewicht, wenn er auf einer Kurve von 170 *m* Radius mit 7 *m* Geschwindigkeit sich bewegt; um welchen Winkel wird dadurch die Schwerkraft abgelenkt; mit welcher Geschwindigkeit dürfte der Zug sich bewegen, wenn die Zentrifugalkraft höchstens 2% vom Gewicht betragen sollte?

238. Wie rasch müßte die Erde sich drehen, damit am Äquator die Schwerkraft durch die Zentrifugalbeschleunigung der Erde gerade aufgehoben wird?

239. Auf eine frei bewegliche Masse von 300 *kg* Gewicht und 4 *m* Geschwindigkeit soll senkrecht zur Richtung der Geschwindigkeit eine Kraft angebracht werden, so daß die Masse sich im Kreis von 40 *m* Radius bewegt. Wie groß muß diese Kraft sein, und wie lange dauert ein Umlauf?

240. Auf eine frei bewegliche Masse von 60 *kg* und 1,5 *m* Geschwindigkeit wirkt senkrecht zur Richtung der Geschwindigkeit eine Kraft von 2 *kg*. Welchen Krümmungsradius hat ihre Kreisbahn und wie groß ist die Umlaufszeit?

241. Auf eine frei bewegliche Masse von 70 *kg* Gewicht und 3 *m* Geschwindigkeit soll senkrecht zur Richtung der Geschwindigkeit eine Kraft wirken, so daß die Masse eine Umlaufszeit von 12" bekommt. Wie groß ist die Kraft und der Radius der Krümmung?

---

242. Wie lang muß ein Pendel sein, das in der Sekunde 2, 3, 4, 10 Schwingungen, das in der Minute 15, 10, 5 Schwingungen macht? ($g = 9{,}81$).

243. In welchem Verhältnis (um wieviel %) muß ein Pendel verändert werden, das seine Uhr täglich um 3 Minuten vorgehen macht (stündlich um 7" nachgehen macht)?

244. Ein Sekundenpendel, das an einem Ort mit der Beschleunigung $g = 9{,}8088$ richtig geht, macht am Äquator täglich 126 Schwingungen zu wenig, an einem andern Ort täglich 44 Schwingungen zu viel. Wie groß ist dort die Erdbeschleunigung?

245. Wie groß ist die Erdbeschleunigung, wenn ein Pendel von 0,9926 *m* Länge genau in Sekunden schwingt? Wie groß ist die Erdbeschleunigung, wenn ein Pendel von 0,99 *m* Länge in der Stunde um 14 Schwingungen mehr macht als das Sekundenpendel?

246. Eine Uhr, deren Pendel eine Länge von 0,682 *m* hat,

geht in der Stunde um 1′ 16″ nach; um wieviel muß man die Pendellänge verändern, damit sie recht geht?

247. Um wieviel wird eine Uhr im Tage falsch gehen, wenn man ihr Pendel um $^1/_2{}^0/_0$ verlängert?

248. Zwei Turmuhren haben eiserne Pendel von verschiedener Länge. Wenn nun beide Pendel um gleich viel Grad erwärmt werden, gehen dann beide Uhren um gleichviel falsch?

---

249. Wie lange muß eine konstante Kraft von 20 *kg* auf einen frei beweglichen 840 *kg* schweren Körper wirken, bis er eine Geschwindigkeit von 4 *m* erlangt hat; welche Strecke hat er dabei durchlaufen, und welche Arbeit wurde aufgewendet?

250. Welche Geschwindigkeit bekommt ein Körper von 700 *kg* Gewicht, wenn auf ihn eine Kraft von 30 *kg* längs eines Weges von 65 *m* wirkt; welche Beschleunigung erhält er und wie lange braucht er dazu?

251. Welcher Masse kann eine Kraft von 60 *kg*, welche längs eines Weges von 2 *m* wirkt, eine Geschwindigkeit von 100 *m* erteilen?

252. Welche Kraft übt eine Masse von 400 *kg* und $3^1/_2$ *m* Geschwindigkeit aus, wenn sie 1220 *m* weit läuft, bis sie stehen bleibt; welche Verzögerung hat sie und wie lange braucht sie?

253. Auf welche Länge kann eine Masse von 750 *kg* bei 40 *m* Geschwindigkeit eine konstante Kraft von 9 *kg* hervorbringen; wie groß ist die Verzögerung und wie lange bewegt sich der Körper?

254. Ein Geschoß von 7,7 *kg* Gewicht verläßt das 1,4 *m* lange Rohr mit 440 *m* Geschwindigkeit, wie groß ist der Druck der Pulvergase, welche Beschleunigung erfährt das Geschoß und wie lange braucht es, um das Rohr zu durchlaufen?

Vermischte Aufgaben.

255. Wenn ein Eisberg mit ca. 50 000 *cbm* über das Meerwasser herausragt, wieviel *cbm* sind unter Wasser?

256. Ein cylindrisches Gefäß von a *cm* Durchmesser verengt sich in b *cm* Höhe durch eine horizontale Fläche bis auf einen c *cm* dicken Hals und ist d *cm* ($d > b$) hoch mit Wasser gefüllt. Wie groß ist das Gewicht und der Bodendruck des Wassers? Woher kommt

es, daß nicht der ganze Bodendruck als Gewicht auf die Wagschale drückt?

257. In ein cylindrisches Gefäß von 12 *cm* Durchmesser, das Weingeist (sp g = 0,81) enthält, wird eine Holzkugel von 10 *cm* Durchmesser gelegt. Wenn diese nun schwimmt, indem sie bis zu $^2/_3$ des Durchmessers eintaucht, wie groß ist das sp. G. des Holzes und um wieviel *cm* steigt der Weingeist?

258. Bei einer hydraulischen Presse drückt man auf einen Hebelarm von 35 *cm* Länge mit 12 *kg* Kraft, der andere Hebelarm von 6 *cm* Länge drückt auf einen Kolben von $1^1/_2$ *cm* Durchmesser. Welchen Druck erleidet der Preßkolben, wenn sein Durchmesser 27 *cm* beträgt? Um wieviel steigt das Quecksilber in einer oben verschlossenen, unter 45° geneigten Glasröhre von 80 *cm* Länge, welche mit Luft gefüllt ist und unten in ein Quecksilberreservoir mündet, welches mit der hydraulichen Presse kommuniziert.

259. Ein Stück Holz und ein 10 mal kleineres Stück Eisen sind gleich schwer und wiegen zusammengebunden in der Luft 48 *g* und im Wasser 12,8 *g*. Wie groß sind die sp. Gewichte von Holz und Eisen?

260. (72) Ein Rezipient von 6 *l* Inhalt (1 *l*, 20 *ccm*, *v*) wird 8 mal (n mal) nach einander mittels eines Stiefels von 6 *cm* Durchmesser und 14 *cm* Hubhöhe ausgepumpt. Wie groß ist schließlich der Druck, wenn er Anfangs 730 *mm* (b *mm*) war? Wie oft muß man pumpen, damit der Druck kleiner als 4 *mm* (c *mm*) oder damit die Dichte 50 mal (p mal) kleiner ist als zuerst.

261. Beim Kompressionsmanometer (siehe Fig. 90) ist die Glasröhre 42 *cm* lang. Wie hoch steigt in ihr das Quecksilber bei 2, bei 3 Atm. Dampfdruck?

262. Bei einem Mariotte'schen Apparat ist im geschlossenen Schenkel eine Strecke von 20 *cm* Luft abgesperrt bei einem Barometerstand von 72 *cm*. Es wird nun im offenen Schenkel so viel Quecksilber aufgegossen, daß es um 50 *cm* höher steht als zuerst. Wie hoch steht es dann im geschlossenen Schenkel, wenn beide gleich weit sind?

263. Beim Mariotte'schen Versuch sind zuerst 20 *cm* Luft unter einem Barometerstand von 23 *cm* abgesperrt. Der offene Schenkel wird nun so tief gesenkt, daß das Quecksilber in ihm um 45 *cm* tiefer steht, als es zuerst in ihm stand. Um wieviel hat sich die Luft ausgedehnt?

264. Beim Mariotte'schen Versuch nimmt die Luft im geschlossenen Schenkel a cm ein, während im offenen Schenkel das Quecksilber um c cm höher steht, bei b cm Barometerstand. Welches Volumen wird die Luft einnehmen, wenn man den geschlossenen Schenkel um d cm hebt, oder um 2 d cm senkt? Der Querschnitt der offenen Röhre ist q mal größer.

265. Ein wie ein Stechheber geformtes Glasgefäß von 80 *cm* Länge ist durch Eintauchen 50 *cm* hoch mit Wasser (Weingeist) gefüllt. Auf welcher Höhe wird die Flüssigkeit stehen, nachdem der Heber herausgehoben ist?

266. Bei einem Versuch über das Mariotte'sche Gesetz nimmt die Luft im geschlossenen Schenkel eine Höhe von 12 *cm* (a *cm*) ein, während im offenen Schenkel das Quecksilber um 30 *cm* (c *cm*) höher steht, bei einem Barometerstande von 70 *cm* (b *cm*). Beide Schenkel sind unten durch einen langen, biegsamen, auch mit Quecksilber gefüllten Kautschuckschlauch verbunden. Welche Höhe wird die Luft im geschlossenen Schenkel einnehmen, wenn man den offenen Schenkel noch um 50 *cm* (d *cm*) hebt, oder um 50 *cm* (d *cm*) senkt. Der Querschnitt der offenen Röhre soll dabei entweder ebensogroß oder 2 mal (q mal) größer angenommen werden, als der der geschlossenen.

267. Bei einem Versuche über das Mariotte'sche Gesetz befinden sich 12 *cm* Luft von und bei 70 *cm* Barometerstand in der geschlossenen Röhre. Um wieviel muß der offene Schenkel gesenkt werden, damit das Quecksilber im geschlossenen Schenkel um 8 *cm* fällt, und um wie viel muß er gehoben werden, damit es um 4 *cm* steigt?

268. Eine Uförmig gebogene Glasröhre ist überall gleichweit und am einen Ende verschlossen. Sie ist bei 72 *cm* Barometerstand so mit Quecksilber gefüllt, daß im geschlossenen Schenkel eine Luftsäule von 30 *cm* Länge abgesperrt ist, während das Quecksilber beiderseits gleich hoch steht. Wie hoch wird das Quecksilber im geschlossenen Rohre steigen, wenn der offene Schenkel, welcher ebenso hoch ist als der geschlossene, gerade voll Quecksilber gefüllt wird? Wie hoch wird es steigen, wenn der offene Schenkel länger ist als der geschlossene und noch 40 *cm* über das Ende des geschlossenen hinaus voll Quecksilber gefüllt wird?

269. Der Stiefel einer Kompressionspumpe hat a *cdm* Inhalt und ist gefüllt mit Luft von b *cm* Druck. Er kann durch einen Hahn in Verbindung gesetzt werden mit einem Gefäß, welches c *cdm* Luft vom Drucke d *cm* enthält. Wenn man nun den Hahn öffnet, welcher gemeinschaftliche Druck stellt sich her? Welcher Druck entsteht, wenn man den Kolben halb, wenn man ihn ganz herunterdrückt? Welcher Druck kommt schließlich zum Vorschein, wenn man das letzte Verfahren n mal nacheinander wiederholt?

270. In einem Rezipienten befinden sich 5 *l* Luft von $2^1/_2$ Atm. Man führt nun einen Kolbenzug aus, wie wenn man den Rezipienten auspumpen wollte. Nach wie viel Kolbenzügen ist der Druck unter eine Atm. gesunken, wenn der Durchmesser des Stiefels 5,2 *cm* und die Hubhöhe 20 *cm* ist?

271. Zu a Liter Luft von der Dichte d_1 werden noch v Liter Luft von der Dichte d_2 hinzugefügt. Wie groß ist schließlich die Dichte, α wenn der gemeinsame Raum $a+v$ Liter, β wenn er a Liter, γ wenn er v Liter, δ wenn er c Liter beträgt?

272. Zu a Liter Luft werden 3 mal nach einander v Liter atmosphärische Luft durch Hineinpressen hinzugethan und nach jedem Hineinpressen werden w Liter des Gemisches durch Expansion weggenommen. Wie groß ist der Druck nach jedem dritten Verfahren?

273. Ein Gefäß enthält a Liter Luft von d *cm* Druck; ich lasse aus ihm in einen luftleeren Behälter von v Liter Rauminhalt so viel Luft (durch eine enge Röhre) einströmen, daß sie dort den Druck d_1 hat. Welchen Druck hat sie dann noch im ersten Gefäß?

274. Bei einer Feuerspritze soll das Wasser durch ein 1,4 *cm* weites Strahlrobr 25 *m* emporspringen; wie groß ist der Druck im Windkessel und der Arbeitseffekt der Männer an der Pumpe?

275. Eine einerseits offene Glasröhre von der Länge 1 wird bei einem Luftdrucke b um die Strecke a mit dem offenen Ende vertikal in Wasser getaucht. Wie hoch steht das Wasser in der Röhre? $l = 1{,}45$ *m*, $b = 10{,}34$ *m* Wasser, $a = 0{,}71$ *m*.

276. Das Volumen eines Gases beträgt bei 16^0 Wärme und einem Barometerstand von 753 *mm* 20 *cbm*. Um wie viel wird es zunehmen bei 25^0 Wärme und 740 *mm* Barometerstand?

277. Bei 36^0 R und 700 *mm* Druck wurde in einer cylindrischen Glasröhre von 3 *cm* Durchmesser ein Raum von 20 *cm* Luft abgesperrt. Was wiegt diese, wenn 1 *ccm* Luft bei 0^0 und 760 *mm* Druck 0,00129 g wiegt?

278. Welche äußere Arbeit leistet ein Kubikmeter Luft von 15^0, wenn man ihn auf 80^0 erwärmt, dadurch, daß er einen Luftdruck von 730 *mm* überwindet?

279. Wenn 14 *l* Luft von 76 *cm* Druck und 20 *l* Luft von 92 *cm* Druck und gleicher Temperatur unter Beibehaltung der Temperatur in ein Gefäß von 25 *l* Rauminhalt vereinigt werden, welche Expansivkraft haben sie dann?

280. In 3,36 *l* Wasser von 16^0 R wird ein Stück Eisen von 5 *kg* Gewicht und 131^0 F gelegt; wieviel Grad C beträgt die Endtemperatur, wenn die spez. Wärme des Eisens 0,112 ist?

281. Durch eine bikonvexe Linse erhält man von einem 3 *m* entfernten Punkte ein reelles Bild in 13 *cm* Entfernung. Wo erscheint das Bild, wenn der leuchtende Punkt nur 5 *cm* von der Linse absteht, und welcher Art ist es?

282. 180 *cm* vor einer positiven Linse von 60 *cm* Brennweite befindet sich ein leuchtender Punkt. Wo muß hinter dieser ersten Linse eine zweite positive Linse von 30 *cm* Brennweite ein=

geschaltet werden, damit das reelle Bild 70 *cm* hinter der ersten Linse entsteht?

283. Vor einem Hohlspiegel steht ein Körper in 120 *cm* Entfernung. Wird er dem Spiegel um 30 *cm* näher gerückt, so entfernt sich das Bild um 5 *cm* vom Spiegel. Wo lag das Bild zuerst und wie groß ist die Brennweite des Hohlspiegels?

284. Durch eine bikonvexe Linse erhält man von einem 3 *m* entfernten Punkte ein reelles Bild in 13 *cm* Entfernung; wo erscheint das Bild, wenn der leuchtende Punkt nur 5 *cm* von der Linse absteht, und welcher Art ist es?

285. Bei einem astronomischen Fernrohr hat die Objektivlinse 90 *cm* Brennweite, das Okular 5 *cm* Brennweite; wie weit müssen beide von einander abstehen, damit das Bild unendlich ferner Gegenstände in der deutlichen Sehweite $\delta = 20$ *cm* entsteht, und wie stark ist dann die Vergrößerung?

286. Berechne dasselbe, wenn der Gegenstand 2 *m* hoch und 50 *m* entfernt ist.

287. Bei einem Operngucker ist die Brennweite des Objektivs 12 *cm*, die des Okulars -3 *cm*. In welcher Entfernung von einander müssen die Linsen gehalten werden, damit das Bild unendlich ferner Gegenstände in der deutlichen Sehweite $\delta = 20$ *cm* erscheint, und wie stark ist die Vergrößerung?

288. Berechne dasselbe, wenn das Objektiv 6 *m* entfernt ist, und der Operngucker auf $\delta = 30$ *cm* bequeme Sehweite eingestellt ist.

289. Bei einem Mikroskop beträgt die Brennweite des Objektivs 4 *mm*, die des Okulars 2 *cm*; beide sind 12 *cm* von einander entfernt. In welchem Abstand vom Objektiv muß das Objekt gehalten werden, damit das Bild in einer Sehweite von $\delta = 18$ *cm* erscheint?

290. Auf der Hauptachse eines Hohlspiegels von $r = 11$ *cm* Krümmungsradius befindet sich ein leuchtender Punkt, $a = 30$ *cm* vom Spiegel entfernt. Ein von ihm ausgehender Lichtstrahl trifft einen Punkt des Spiegels, welcher um 30^0 von der Hauptachse absteht. Wo schneidet der reflektierte Strahl die Hauptachse?

291. Dadurch, daß man auf den 24 *cm* langen Arm eines Druckhebels einen Druck von 32 *kg* ausübt, drückt man den am 5 *cm* langen Arm angebrachten Kolben in eine Röhre von 6 *cm* Durchmesser, und übt dadurch einen Druck auf Quecksilber aus. Wie hoch wird dieses dadurch in einer kommunizierenden Röhre gehoben?

292. Durch eine Maschine wird in 4 Stunden eine gewisse Menge Wasser auf eine gewisse Höhe geschafft. In 3 Stunden kann durch dieselbe Maschine nur eine um 1000 *l* geringere Menge auf dieselbe Höhe, oder dieselbe Menge auf eine um 8 *m* geringere Höhe

geschafft werden. Wieviel Liter wurden zuerst gefördert und wie hoch, und wie viele Pferdekräfte liefert die Maschine?

293. Eine horizontale Stange AD von 100 *cm* Länge und 27 *kg* Gewicht, das in der Mitte M angreift, ist in A drehbar befestigt. An ihr wirkt in B (AB = 38 *cm*) eine Kraft $P_1 = 85$ *kg* unter einem Winkel $ABP_1 = 117^0$, im Punkt C (AC = 63 *cm*) wirkt $P_2 = 20$ *kg* senkrecht nach aufwärts. Welche Kraft ist im Endpunkte D senkrecht zur Stange anzubringen, damit sie sich nicht dreht?

294. Eine unter 20^0 nach aufwärts geneigte Stange AB von 48 *cm* Länge ist am untern Ende A drehbar befestigt, während in B eine Last von 80 *kg* vertikal abwärts wirkt. Welche Kraft muß im Punkte C horizontal angebracht werden, wenn AC = 30 *cm* ist, und die Stange im Gleichgewichte sein soll?

295. An den Enden A und B einer Stange wirken die Kräfte $P_1 = 65$ *kg* und $P_2 = 93$ *kg* unter den Winkeln $P_1AB = 102^0$ und $P_2BA = 127^0$. Wo, in welcher Richtung und wie stark ist die Stange zu stützen, damit Gleichgewicht vorhanden ist?

296. Wie stellt sich die Lösung der vorigen Aufgabe, wenn das Gewicht der Stange, 40 *kg*, in ihrer Mitte angreift und berücksichtigt wird?

297. Eine Stange ist in A drehbar befestigt, und von da an unter 45^0 nach aufwärts geneigt. An ihr wirken in den Abständen AB = 2, AC = 5, AD = 6 die Kräfte $P_1 = 9$, $P_2 = 17$, $P_3 = 14$ alle in vertikaler Richtung. Welche Kraft muß in der Mitte der Stange senkrecht zu ihr (welche in horizontaler Richtung) noch hinzugefügt werden, damit sie sich nicht dreht?

298. Eine Stange ist in A drehbar befestigt und schräg nach abwärts geneigt. An ihr wirken im Abstand AB = 17 *cm* und AC = 39 *cm* die vertikalen Kräfte $P_1 = 51$ und $P_2 = 42$, und im Abstand AD = 45 *cm* wirkt die Kraft $P_3 = 60$ in horizontaler Richtung. Welche Neigung wird die Stange annehmen, um im Gleichgewicht zu sein?

299. Ein Kegel, dessen Seitenkante mit der Achse einen Winkel α bildet, ruht längs einer Seitenkante auf einer horizontalen Ebene; wo trifft die von seinem Schwerpunkt auf die Ebene gefällte Senkrechte die Seitenkante, und wie groß muß der Winkel α sein, damit jener Fußpunkt gerade in der Mitte der Seitenkante liegt?

300. Ein Körper fällt 45 *m* hoch herunter und trifft dann auf eine Platte, welche unten 30^0 gegen den Horizont geneigt ist. Von der Platte wird er nach den Gesetzen des elastischen Stoßes

zurückgeworfen. Wie hoch steigt er wieder, wann und wo erreicht er den Boden?

301. Als ein Körper mit der Anfangsgeschwindigkeit a über eine schiefe Ebene von der Länge l herunterlief, hatte er die Endgeschwindigkeit v. Wie groß war die Reibung, wenn der Neigungswinkel $\alpha = 8^0$ war? (a = 40 *m*, $v = 30$ *m*, l = 100 *m*.)

302. Welche Neigung muß ein über einer gegebenen Hausbreite errichtetes Dach haben, damit das Regenwasser möglichst rasch abläuft. (Auf Reibung wird keine Rücksicht genommen.)

303. Wasser fließt aus einem vertikalen Gefäß bei einer horizontalen Öffnung aus und trifft die um a *m* tiefer liegende Tischfläche b *m* von der Gefäßwand entfernt. Mit welcher Geschwindigkeit fließt es aus und wie hoch ist die überstehende Wassersäule?

304. Mit welcher Geschwindigkeit fließt Wasser unten aus einem cylindrischen Gefäß aus, wenn es im Gefäß 38 *cm* hoch steht und oben noch mit einem 15 *cm* hohen cylindrischen Eisenkörper von der Weite des Cylinders beschwert ist? Wie groß ist die Steighöhe des Wassers?

305. Ein Eisenbahnwagen wird von einer Lokomotive mit einer Geschwindigkeit von a = 20 *m* eine schiefe Ebene von $\alpha = 5^0$ hinaufgestoßen. Wie lange und wie weit bewegt sich der Wagen 1) ohne Reibung, 2) mit dem Reibungskoeffizient c = 0,005?

306. Ein Körper wird über eine schiefe Ebene von α^0 Neigung aufwärts geworfen, und soll, wenn er wieder unten ankommt, die Hälfte seiner lebendigen Kraft verloren haben. Wie groß ist die Reibung auf der schiefen Ebene?

307. Ein Wagen von 200 Ctr. Gewicht hat auf einem Geleise eine Geschwindigkeit von 6,2 *m* und eine Reibung von 0,005; wie weit darf er laufen, bis er nur mehr die halbe lebendige Kraft hat, oder bis er $\frac{3}{5}$ vor seiner lebendigen Kraft verloren hat?

308. Ein Körper von der Masse Q fällt frei über eine Höhe von h *m* und dringt dann in einem Stoff c *cm* tief ein. Wie groß ist der Widerstand des Stoffes?

309. Eine Masse Q hat a *m* Geschwindigkeit und wird so beschleunigt, daß sie nach t Sekunden eine lebendige Kraft (Bewegungsenergie) von L *kgm* hat. Wie groß ist die beschleunigende Kraft und welchen Weg hat die Masse zurückgelegt?

310. Mit welcher Geschwindigkeit muß ein Körper aufwärts geworfen werden, damit er in t″ seine lebendige Kraft zur Hälfte verliert, und wie hoch ist er dabei gekommen?

311. Wirft man einen Körper ein zweitesmal unter einem doppelt so großen Elevationswinkel wie zuerst, so wird seine Wurfweite $1\frac{2}{5}$ mal kleiner als zuerst. Wie groß war sie zuerst?

312. Eine in Bewegung befindliche Masse hat eine lebendige

Kraft von 780 *kgm*. Als sich ihr ein Widerstand von 3 *kg* entgegenstellte, legte sie die folgenden 130 *m* in 12″ zurück. Wie groß war die Masse und ihre Geschwindigkeit?

313. Bewegt sich ein Körper von 15 *m* Anfangsgeschwindigkeit zuerst gleichförmig und dann noch mit einer Verzögerung von 2 *m*, so kommt er 134 *m* weit. Bewegt er sich aber die ganze Zeit mit der Verzögerung von 2 *m*, so kommt er nur 50 *m* weit. Wie lange bewegt er sich mit, wie lange ohne Verzögerung?

314. Aus einer Feuerspritze springt der Wasserstrahl 24 *m* hoch. Welcher Druck herrscht im Windkessel, wenn der Strahl um $\frac{1}{4}$ weniger hoch springt als er der Theorie nach springen sollte. Wie rasch muß gepumpt werden, wenn das Strahlrohr 1 *cm* Durchmesser hat, und wenn jeder Pumpenstiefel 10 *cm* Durchmesser und 12 *cm* Hubhöhe hat, und wie groß ist in jeder Sekunde die Arbeit, welche zur Bedienung der Spritze nötig ist?

315. Ein Körper wird mit 60 *m* Anfangsgeschwindigkeit über eine schiefe Ebene von 120 *m* Länge und 30⁰ Steigung hinaufgeworfen, und fliegt am Ende derselben frei durch die Luft. Wo wird er den Boden wieder erreichen?

316. Eine Masse von Q *kg* soll auf einer schiefen Ebene von der Länge l und der Neigung α hinaufgeschafft werden dadurch, daß an sie ein Seil parallel der schiefen Ebene gebunden ist, welches oben über eine Rolle läuft und dann durch ein Gewicht von P *kg* beschwert ist. Wie lange braucht Q, um die schiefe Ebene zu durchlaufen?

317. Ein Körper wird von der Spitze eines h *m* hohen Turmes horizontal geworfen. Wann, wo, unter welchem Winkel und welcher lebendigen Kraft trifft er den Boden, wenn seine Anfangsgeschwindigkeit a *m* und sein Gewicht Q *kg* beträgt?

318. Über einen beiderseits unter α^0 ansteigenden Berg von h *m* Höhe soll vom Fuß aus ein Körper so geworfen werden, daß er die Spitze knapp überfliegt und den jenseitigen Fuß trifft. Mit welcher Geschwindigkeit und Elevation ist er zu werfen?

319. Wo und unter welchem Winkel trifft eine mit a *m* Anfangsgeschwindigkeit und der Elevation α abgeschlossene Kugel eine b *m* entfernte vertikale Wand?

320. Eine Masse von Q *kg* Gewicht hat a *m* Anfangsgeschwindigkeit. Wie weit wird sie horizantal noch laufen, α) bis sie stehen bleibt, β) bis ihre Geschwindigkeit um 20 $^0/_0$ abgenommen hat, γ) bis ihre lebendige Kraft um 40 $^0/_0$ abgenommen hat, wenn der Reibungskoeffizient jedesmal c ist?

321. Eine Masse von Q *kg* und a *m* Anfangsgeschwindigkeit hat in t″ einen Weg von s *m* zurückgelegt. Wie groß ist die Verzögerung, und wann wird sie stehen bleiben?

322. Wie rasch muß ein cylindrisches Gefäß von 20 *cm* Durchmesser gedreht werden, damit ein an seinem Rand befindlicher Punkt eine Zentrifugalkraft bekommt, welche 30mal so groß ist als die Schwerkraft?

323. Wenn ein cylindrisches Gefäß von 60 *cm* Durchmesser so rasch gedreht wird, daß es in der Sekunde 4 Umdrehungen macht, in welcher Richtung wirkt dann auf einen in seinem Umfang befindlichen Punkt die Resultierende aus der Schwerkraft und der Zentrifugalkraft?

324. Ein Sekundenpendel aus Eisen von $l = 993$ *mm* Länge geht bei 14^0 richtig. Um wie viele Sekunden geht es im Winter bei -10^0 in 24 Stunden vor? (Ausdehnungskoeffizient des Eisens $= 0{,}000\,012$).

325. Welche Schwingungszeit hat ein eisernes Pendel von 1,42 *m* Länge und um wie viel wird eine durch dieses Pendel regulierte Uhr in der Stunde nachgehen, wenn die Temperatur um 20^0 steigt?

326. Auf einen Körper von 50 *kg* Gewicht und 6 *m* Geschwindigkeit trifft ein ihm folgender Körper von 20 *kg* Gewicht und 10 *m* Geschwindigkeit in zentralem Stoße. Welche Geschwindigkeit haben sie nach einem unelastischen Stoß, und welche hat jeder nach dem elastischen Stoße?

327. Zwei Körper von 15 *kg* und 8 *kg* Gewicht laufen einander entgegen mit 3 *m* bezw. 2 *m* Geschwindigkeit. Wie groß sind die Geschwindigkeiten a nach dem unelastischen, b nach dem elastischen Stoße?

328. Von links her kommt eine Masse $M = 12$ *kg* mit der Geschwindigkeit $v_1 = 2$ *m*; von rechts kommt die Masse $m = 5$ *kg* mit der Geschwindigkeit $v_2 = 7$ *m*. Man berechne ihre Geschwindigkeit nach zentralem Stoß, a unelastisch, b elastisch.

329. Eine Masse $m = 5$ hat die Geschwindigkeit $v_1 = 6$ nach rechts; sie wird verfolgt und eingeholt von einer Masse $M = 8$ mit der Geschwindigkeit $v_2 = 11$ nach rechts. Welche Geschwindigkeiten haben beide nach dem unelastischen und nach dem elastischen Stoße?

Alphabetisches Sachregister.

Recknagel, Georg, Thermometrische Versuche. Habilitationsschrift. Mit 1 lith. Tafel. [IV u.] 44 S. gr. 8⁰. 1863. M. —.60.

Schüler, Wilhelm Friedrich, Lehrbuch der analytischen Geometrie des Punktes, der Geraden und der Kegelschnitte, dann der Strahlbüschel und Punktreihen (projektivische Geometrie). Mit Uebungsaufgaben. Mit 4 Tafeln in Steindruck. XI u. 247 S. gr. 8⁰. 1879. M. 4.80.

Sickenberger, Adolf, Leitfaden der Arithmetik nebst Übungsbeispielen. Sechste Auflage. Mit 6 Holzschnitten. VII u. 196 S. gr. 8⁰. 1895. M. 1.60.

— Die Determinanten in genetischer Behandlung zur Einführung für Anfänger. Zweiter Abdruck. VII u. 80 S. gr. 8⁰. 1887. M. 1.60.

— Leitfaden der elementaren Mathematik.

Erster Teil. Algebra. Dritte Auflage. V u. 75 S. gr. 8⁰. 1894. M. 1.20.

Zweiter Teil. Planimetrie. Mit 92 Figuren im Text. Dritte Auflage. VI u. 123 S. gr. 8⁰. 1896. M. 1.50.

Dritter Teil. Stereometrie. — Trigonometrie. Mit 54 Figuren im Text. Zweite Auflage. [IV u.] 103 S. gr. 8⁰. 1894. M. 1.20.

— Vierstellige logarithmisch-trigonometrische Tafel zum Schul- und Handgebrauch zusammengestellt. Dritte Auflage. 20 S. 8⁰. 1897. M. —.40.

— Übungsbuch zur Algebra.

Erste Abteilung: Erste und zweite Stufe der Rechnungsarten einschliesslich der lineären Gleichungen mit einer und mehreren Unbekannten. Zweite Auflage. [VI u.] 106 S. gr. 8⁰. 1895. M. 1.20.

Zweite Abteilung: Dritte Stufe der Rechnungsarten, quadratische Gleichungen, Reihen, Kombinatorik. [IV u.] 136 S. gr. 8⁰. 1890. M. 1.80.

Druck von C. Brügel und Sohn in Ansbach.

Bögl

Winter, Wilh.

Lehrbuch der Physik zum Schulgebrauche Mit 354 eingedr. Abbildungen

München 1897